

Статья поступила в редакцию: 09.08.2026

Статья принята к публикации: 15.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 665.7+660.3

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23326

Подготовка контактного газа окислительной конденсации метана для последующих нефтехимических синтезов

Турсунова Наргиза Самаритдиновна

PhD, доц.

кафедры химии полимеров и химической технологии, Самаркандский государственный

университет имени Шарофа Рашидова

Республика Узбекистан, г. Самарканд

E-mail: t-nargiza2019@mail.ru

Preparation of contact gas from oxidative coupling of methane for subsequent petrochemical syntheses

Tursunova Nargiza Samaritdinovna

PhD, Associate Professor

Department of Polymer Chemistry and Chemical Technology Samarkand State University named

after Sharof Rashidov

Uzbekistan, Samarkand

Аннотация

В статье рассматриваются технологические возможности подготовки этиленсодержащего контактного газа, образующегося при окислительной конденсации метана, для последующих нефтехимических синтезов без глубокой криогенной сепарации. Цель исследования заключается в обосновании последовательности технологических операций, обеспечивающих получение безопасного, стабильного и приемлемого по составу газового потока для дальнейшей переработки. Методологическая основа работы включает сравнительный анализ современных технологических решений по очистке и подготовке контактного газа, а также сопоставление вариантов выделения высокочистого этилена и прямого использования этиленсодержащего потока по критериям энергоемкости, капиталоемкости, технологической интеграции и промышленной применимости. Рассмотрены конденсация водяного пара, абсорбция CO_2 растворами K_2CO_3 , моноэтаноламина (МЭА) и метилдиэтаноламина (МДЭА), контроль остаточного кислорода, осушка газа, конверсия CO водяным паром и последующее метанирование. Установлено, что последовательность этих стадий должна определяться составом исходного газа, требованиями последующего синтеза и условиями работы компрессорного оборудования.

Библиографическое описание: Турсунова Н.С. Подготовка контактного газа окислительной конденсации метана для последующих нефтехимических синтезов // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23326>

Прямое использование контактного газа позволяет сократить число стадий глубокой сепарации и создать условия для рекуперации тепла. Практическая значимость подхода состоит в возможности технологической интеграции очистки и последующего синтеза, тогда как потенциальное снижение энергетических и капитальных затрат требует отдельной технико-экономической оценки.

Abstract

This article examines technological approaches to preparing ethylene-containing contact gas produced during oxidative coupling of methane for subsequent petrochemical syntheses without deep cryogenic separation. The study aims to substantiate a sequence of processing steps that can provide a safe, stable, and compositionally acceptable gas stream for further conversion. The methodology is based on a comparative analysis of current gas-treatment and process-integration approaches, including high-purity ethylene recovery and the direct use of ethylene-containing contact gas, with emphasis on energy demand, capital intensity, integration potential, and industrial applicability. The preparation scheme includes water-vapor condensation, CO₂ absorption with K₂CO₃, monoethanolamine (MEA), or methyldiethanolamine (MDEA), residual oxygen control, gas drying, CO conversion by the water-gas shift reaction, and subsequent methanation. The analysis shows that the sequence of these operations should be selected according to feed-gas composition, downstream synthesis requirements, and compressor operating conditions. Direct use of contact gas can reduce the number of deep-separation stages and create opportunities for heat recovery, whereas potential reductions in energy and capital costs require a separate techno-economic assessment.

Ключевые слова: окислительная конденсация метана, контактный газ, этилен, конверсия водяного газа, абсорбция диоксида углерода, метанирование, технологическая интеграция.

Keywords: oxidative coupling of methane, contact gas, ethylene, water gas shift, carbon dioxide absorption, methanation, process integration.

Введение

Глубокая химическая переработка природного газа является одним из актуальных направлений современной химической технологии, ориентированным на получение продуктов с высокой добавленной стоимостью [6]. Одним из перспективных способов прямой конверсии метана является окислительная конденсация метана (ОКМ), позволяющая получать C₂-углеводороды, прежде всего этан и этилен [1; 3; 8; 9; 11]. В отличие от многостадийных маршрутов, данный процесс позволяет исключить промежуточные стадии получения синтез-газа и метанола [1; 3].

Одним из экономически значимых направлений использования этилена, полученного методом ОКМ, является его вовлечение в процессы алкилирования изобутана. После очистки, сжатия, удаления CO₂ и организации рециркуляции этиленсодержащий контактный газ может поступать в реактор синтеза изопарафиновых компонентов [2; 4; 7]. Алкилирование олефинов изоалканами в присутствии соответствующих катализаторов позволяет получать высокооктановые компоненты моторных топлив. Таким образом,

технологии ОКМ можно рассматривать не только как способ получения этилена, но и как интегрированную платформу превращения метана в жидкие топливные компоненты и нефтехимические полупродукты [2; 4; 7].

Контактный газ такого состава может рассматриваться как промежуточное сырьё для производства этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана и винилхлорида, винилацетата, а также для процессов алкилирования изобутана олефинами. При этом для каждого из указанных направлений требования к содержанию CO, CO₂, O₂, H₂O, CH₄ и других компонентов контактного газа должны устанавливаться отдельно с учётом особенностей последующего технологического процесса. Близкие по типу многокомпонентные этиленсодержащие газовые потоки формируются при паровом крекинге углеводородов и в процессах переработки крекинг-газа, где также требуются удаление примесей, осушка и селективное выделение либо дальнейшее использование этилена [5; 10].

Цель исследования заключается в обосновании технологической последовательности подготовки этиленсодержащего контактного газа ОКМ для его последующего использования в нефтехимических синтезах без глубокой криогенной сепарации. Для достижения поставленной цели проведено сравнение вариантов выделения высокочистого этилена и прямого использования контактного газа, рассмотрены основные стадии удаления CO, CO₂, водяного пара и остаточного кислорода, а также проанализированы возможности тепловой и технологической интеграции отдельных стадий процесса. Элемент научной новизны работы состоит в систематизации требований к подготовке контактного газа ОКМ по единой технологической схеме и в сопоставлении вариантов его дальнейшего использования с учётом состава газа, глубины очистки и требований последующего синтеза.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы современные научные публикации и технологические данные, посвящённые окислительной конденсации метана, очистке этиленсодержащих газовых смесей, выделению этилена и его последующему использованию в нефтехимических процессах. В работе применены методы сравнительного технологического анализа и структурно-функционального сопоставления технологических схем. Варианты получения концентрированного этилена и прямого использования контактного газа сопоставлялись по чистоте целевого продукта, потенциалу энергосбережения, капиталоемкости, простоте технологической интеграции и промышленной адаптируемости.

Результаты и обсуждение

В современном научно-техническом подходе подготовка этиленсодержащего контактного газа рассматривается не как отдельный вспомогательный этап, а как центральное звено концепции использования этилена без его глубокого разделения. Следовательно, схема удаления CO_x из контактного газа должна быть разработана с учетом давления в реакторе, состава газа, использования тепла, баланса водяного пара, материала компрессора, регенерации абсорбента и чувствительности последующего каталитического синтеза к CO и CO₂.

При прямом использовании контактного газа не требуется глубокое криогенное разделение этилена; при этом этилен, содержащийся в контактном газе, полученном в реакторе ОКМ, может использоваться непосредственно либо после частичной очистки в последующих химических синтезах. Данный подход характеризуется повышенной энергоэффективностью и сокращением числа технологических стадий. Такая концепция особенно перспективна для процессов, в которых не требуется высокая степень чистоты этилена, либо когда присутствующие в газовой смеси метан, этан, СО и Н₂ могут выполнять роль инертных или балластных компонентов реакционной среды.

Основная цель концепции контактного газа заключается не в достижении максимальной очистки этилена, а в доведении газовой смеси до безопасного, стабильного и приемлемого состава для последующей реакции. При этом происходит конденсация водяного пара, снижение содержания СО₂ до требуемого уровня, контроль остаточного кислорода, отделение компонентов, отравляющих катализатор, и подача газового потока в следующий реактор синтеза.

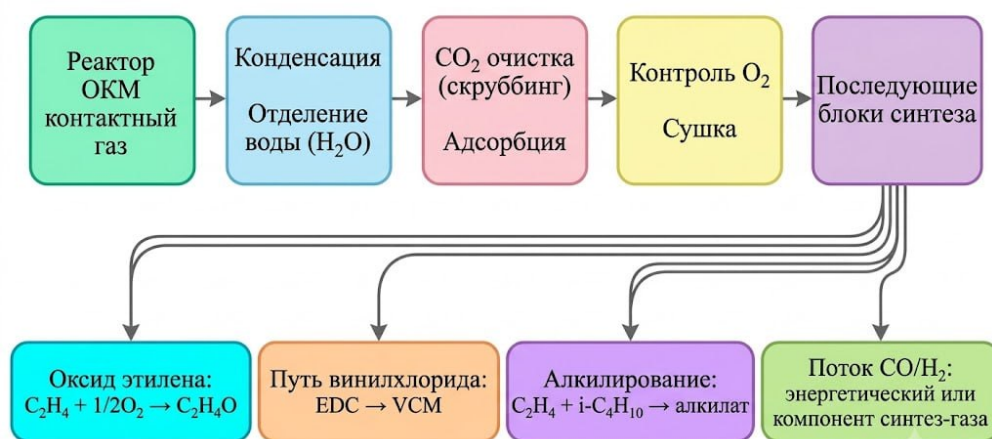


Рисунок 1. Поэтапная подготовка и интеграция контактного газа без глубокого разделения этилена

Этилен, содержащийся в контактном газе, может быть использован для получения этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана и винилхлорида, винилацетата, а также продуктов алкилирования. При этом требования к остаточному содержанию О₂, СО₂, воды и других примесей должны определяться отдельно для каждого последующего процесса с учётом его селективности, каталитической чувствительности и требований безопасности.

Этилен, образующийся в процессе ОКМ, может либо выделяться в виде высокочистого продукта, либо использоваться в составе предварительно подготовленного контактного газа. Получение этилена полимеризационной чистоты требует сжатия, криогенного охлаждения и многоступенчатого разделения, что усложняет технологическую схему и повышает её энергоёмкость.

Прямое использование контактного газа позволяет исключить часть стадий глубокой сепарации и адаптировать состав потока к требованиям последующего синтеза. При этом метан, водород, СО, СО₂, водяной пар и остаточный кислород могут влиять на активность катализаторов, селективность и безопасность процесса, поэтому допустимое содержание

примесей должно определяться индивидуально для каждого направления. Потенциальное снижение энергетических и капитальных затрат требует отдельной технико-экономической оценки.

Недавние научные исследования процесса ОКМ показывают, что фундаментальной проблемой этого процесса является высокая стабильность молекулы метана и более легкое окисление образующихся продуктов C2 по сравнению с метаном. Следовательно, при высоких степенях конверсии селективность снижается. На практике такая ситуация направляет работу реактора не на однократное достижение высокой степени конверсии, а на стратегию умеренной конверсии, высокой селективности, рециркуляции метана и быстрого удаления продукта [1; 3; 8; 9; 11].

Наиболее актуальной проблемой с точки зрения технологической интеграции является преобразование низкой концентрации этилена в газообразном продукте ОКМ в экономически выгодный поток продуктов. Поэтому все большую значимость приобретают такие решения, как прямое использование контактного газа, адсорбционное обогащение этиленом, мембранная сепарация, внутреннее повторное использование тепла, а также оценка потоков CO и H₂ в качестве синтез-газа.

Расположение установки конверсии CO относительно компрессора является одним из важнейших проектных решений в очистке технологических газов ОКМ. Если установка конверсии водяного газа расположена после компрессора, последующая стадия абсорбции CO₂ облегчается за счет более высокого давления, но компрессор работает с CO₂-содержащим, влажным и высокотемпературным газом. Такие условия повышают риск карбонильного коррозионного воздействия, механического воздействия конденсата и требуют использования специальных материалов.

Если конверсия CO осуществляется перед компрессором, через компрессор проходит газ с изменённым содержанием CO и CO₂, что влияет на требования к последующей очистке и конструкционным материалам. Однако этот вариант требует достаточного охлаждения и осушения газа, иначе влага может вызвать эрозию, кавитацию и повреждение рабочих элементов компрессора. Поэтому в практическом проектировании оптимальный вариант выбирается в зависимости от исходного состава газа, содержания CO₂, баланса водяного пара, типа абсорбента CO₂ и материала компрессора.

Вариант А: Конверсия CO после компрессора



Вариант Б: Конверсия CO перед компрессором



Рисунок 2. Два технологических варианта размещения блока преобразования CO относительно компрессора

Поскольку процесс ОКМ имеет ярко выраженную экзотермическую природу, блок синтеза этилена спроектирован не только с реактором и каталитическим слоем, но и с системами рекуперации тепла, генерации пара, охлаждения газа и отделения конденсата. Использование тепла высокотемпературного контактного газа позволяет генерировать технологический пар, использовать его для регенерации абсорбента и других теплопотребляющих операций, а также снизить общее энергопотребление процесса.

Контактный газ ОКМ представляет собой многокомпонентную смесь, содержащую этилен, этан, непрореагировавший метан, CO, CO₂, H₂, водяной пар и остаточный кислород. Целевым компонентом является этилен, поэтому для ограничения его дальнейшего окисления необходимо контролировать подачу кислорода, время контакта и обеспечить быстрое охлаждение реакционной смеси. Непрореагировавший метан целесообразно возвращать в реактор, тогда как содержание остаточного кислорода должно строго контролироваться с учётом требований взрывобезопасности.

Очистка газа включает высокотемпературную конверсию CO при 400–450 °C на железохромовом катализаторе и последующую низкотемпературную конверсию при 200–250 °C на медь-цинк-алюминиевом катализаторе. Образовавшийся CO₂ удаляют растворами K₂CO₃, МЭА или МДЭА, остаточный CO — метанированием на Ni/Al₂O₃ при 200–400 °C. Завершающая осушка молекулярными ситами, оксидом алюминия или конденсацией обеспечивает защиту компрессорного и каталитического оборудования от влаги.

Заключение

Проведённый анализ показал, что этиленсодержащий контактный газ ОКМ может быть подготовлен для последующего использования в синтезе этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана, винилхлорида, винилацетата и продуктов алкилирования без обязательного выделения этилена высокой чистоты. Выбор глубины очистки определяется требованиями конкретного последующего процесса к содержанию CH₄, C₂H₆, H₂, CO, CO₂, H₂O и остаточного O₂.

Рациональная схема подготовки включает отделение воды, конверсию CO, абсорбцию CO₂, метанирование остаточного CO и окончательную осушку газа. Размещение блока конверсии CO относительно компрессора должно учитывать состав и давление газа, водяной баланс, тип абсорбента и конструкционные материалы. Рециркуляция непрореагировавшего метана и рекуперация тепла повышают степень технологической интеграции процесса, тогда как экономический эффект прямого использования контактного газа требует отдельной технико-экономической оценки.

Список литературы

1. Alkathiri R., Alshamrani A., Wazeer I., Boumaza M., Hadj-Kali M.K. Optimization of the Oxidative Coupling of Methane Process for Ethylene Production // Processes. – 2022. – Т. 10, № 6. – Art. 1085. – DOI: 10.3390/pr10061085.

2. Cao P., Zheng W., Sun W., Zhao L. The Shape Selectivity of Zeolites in Isobutane Alkylation: An Investigation Using CBMC and MD Simulations // *Chemical Engineering Science*. – 2021. – Т. 245. – Art. 116966. – DOI: 10.1016/j.ces.2021.116966.
3. Da Ros S., Fontoura T.B., Schwaab M. de Jesus N.J.C., Pinto J.C. Oxidative Coupling of Methane for Ethylene Production: Reviewing Kinetic Modelling Approaches, Thermodynamics and Catalysts // *Processes*. – 2021. – Т. 9, № 12. – Art. 2196. – DOI: 10.3390/pr9122196.
4. Ethylene to Alkylate Process by Next Wave Energy // *S&P Global Process Economics Program Review*. – 2020.
5. Gholami Z., Gholami F. Tišler Z., Vakili M. A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons // *Energies*. – 2021. – Т. 14, № 23. – Art. 8190. – DOI: 10.3390/en14238190.
6. Jiang J. et al. Methyl Radical Dominated Highly Selective Methane Oxidation to Liquid Oxygenates // *Journal of the American Chemical Society*. – 2025. – Т. 147, № 39. – DOI: 10.1021/jacs.5c13767.
7. Jin M., Oh M., Choi M. Hierarchical BEA Zeolite with Trimodal Micro-/Meso-/Macroporosity as a Selective and Long-Lived Catalyst for Isobutane/2-Butene Alkylation // *ACS Catalysis*. – 2022. – Т. 12, № 7. – DOI: 10.1021/acscatal.1c05786.
8. Karsten T., Perez Ortiz A., Schomäcker R., Repke J.-U. Performance Evaluation of Different Reactor Concepts for the Oxidative Coupling of Methane on Miniplant Scale // *Methane*. – 2025. – Т. 4, № 4. – DOI: 10.3390/methane4040025.
9. Kim M., Arndt S., Yildiz M., Schomäcker R., Görke O., Repke J.-U., Wozny G., Godini H.R. Reaction Engineering of Oxidative Coupling of Methane: Experimental Observations and Analysis of the Impacts of Operating Parameters // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2021. – Т. 172. – DOI: 10.1016/j.cherd.2021.04.029.
10. Peng X., Zhao L., Peng Y.-L., Deng C., Andaloussi Y.H., Pan H., Tian Y.-J., Zou J.-S., Krishna R., Liu B., Deng C., Xiao P., Sun C., Zaworotko M.J., Chen G., Zhang Z. One-Step Ethylene Purification from a Seven-Component Cracking Gas Mixture with Sorbent-Sorbate Induced-Fit // *CCS Chemistry*. – 2025. – Т. 7, № 4. – DOI: 10.31635/ccschem.024.202403977.
11. Wadkar C., Kumar A., Lee H., Rollins B., Grosjean N., Singh S., Northrop W.F. Computational Study on the Effect of Thermal Boundary Conditions and Axial Aspect Ratio on Catalytic Oxidative Coupling of Methane // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2023. – Т. 62, № 46. – DOI: 10.1021/acs.iecr.3c02285.