

УДК 622.276/.279

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ (ОБЗОР)

© 2023 г. Н. Н. Петрухина<sup>1,\*</sup>, А. Л. Максимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН, Москва, 119991 Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Химический факультет, Москва, 119991 Россия

\* E-mail: n.petrkhina@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.

После доработки 11.12.2022

Принята к публикации 31.01.2023

По данным работ, описывающих результаты физического (лабораторного) и математического моделирования применения диметилового эфира (ДМЭ) для повышения нефтеотдачи, проанализированы перспективы указанной технологии. Рассмотрен механизм интенсификации извлечения нефти и повышения нефтеотдачи при закачке его в пласт. Оценены основные факторы, влияющие на коэффициент распределения ДМЭ между нефтяной и водной фазами. Выявлены преимущества нагнетания в пласт ДМЭ перед закачкой в пласт углеводородных газов и диоксида углерода. Проведен анализ комбинированных технологий повышения нефтеотдачи, включающих закачку в пласт ДМЭ, диоксида углерода, растворов полимеров, водяного пара. Кратко обсуждается возможность применения ДМЭ для разделения нефтяных шламмов.

**Ключевые слова:** диметиловый эфир; повышение нефтеотдачи; добыча нефти; интенсификация нефтедобычи

DOI: 10.53392/27823857-2023-3-1-74; EDN: GNBTEF

### Введение

Рынок диметилового эфира (ДМЭ) непрерывно развивается, спрос на этот продукт и объем его производства возрастают год от года. Ожидается практически двукратное увеличение производства ДМЭ к 2028 г. в сравнении с 2021 г. [1]. Основные производители ДМЭ находятся в Китае, США, Нидерландах, Индонезии, Корее, Японии [1, 2]. Недавно первые многотоннажные предприятия по производству ДМЭ появились и на территории России (например, производительностью 10 тыс. т/год в г. Дзержинск, Нижегородская обл.; производительностью 20 тыс. т/год — ОАО «Щекиноазот», Тульская обл.).

Более 80% ДМЭ, произведенного в мире в 2020 г. было использовано в качестве замены сжиженного углеводородного газа на рынке энергоносителей, 8% — при производстве аэрозолей, еще меньше — в качестве топлива на транспорте, и только небольшая доля — в химической и нефтехимической отраслях [1], где ДМЭ используется в производстве пестицидов, диметилсульфата, при алкилировании ароматических аминов и др. Разработаны, либо находятся в стадии апробации технологии произ-

водства из ДМЭ углеводородов — компонентов высокооктанового бензина [3], олефинов [4], диметиоксиметана, этанола, полиоксиметилендиметилового эфира [5].

Переработка углеродсодержащего сырья в ДМЭ реализуется через синтез-газ. Существуют два маршрута превращения синтез-газа в ДМЭ: в две стадии через метанол и одностадийный прямой синтез ДМЭ из синтез-газа. Двухстадийный «метанольный» способ производства ДМЭ разработан фирмами «Haldor Topsoe», «Lurgi», «Mitsubishi Gas Chemicals», «Toyo Engineering Corporation» и др. [6, 7]. Процессы прямого синтеза ДМЭ из синтез-газа предлагают компании «Haldor Topsoe», «JFE Holdings», «KOGAS», «SINOPEC», «Air Products & Chemicals», «Mobil Oil», а также ИНХС РАН и др. институты. Будущее развитие мирового производства ДМЭ связывают с прямой конверсией синтез-газа в ДМЭ, что экономически более целесообразно в сравнении с двухстадийным синтезом. Данная технология разрабатывается с середины 1970-х гг., в том числе несколькими научно-исследовательскими коллективами в России (ИНХС РАН, ОИВТ РАН, ИК СО РАН, Томский государствен-

ный университет и др.) [6, 8–11]. В настоящее время также разрабатывается двухстадийный процесс конверсии  $\text{CO}_2$  в ДМЭ через синтез метанола, перспективный с точки зрения снижения выбросов парниковых газов и утилизации диоксида углерода [12].

Основные преимущества использования ДМЭ в качестве топлива рассмотрены в многочисленных обзорах, в том числе в работах [6, 8, 13, 14]. Среди глобальных преимуществ — возможность диверсификации ресурсов углеводородов и использования альтернативных источников углеродсодержащего сырья, декарбонизации экономики, снижения выбросов парниковых газов, утилизации  $\text{CO}_2$  в производстве ДМЭ. Данные преимущества ДМЭ, а также его высокая растворимость в углеводородах и воде легли в основу идеи использования ДМЭ для закачки в пласт в технологиях повышения нефтеотдачи [15–17].

Первая заявка на патент на технологию повышения нефтеотдачи с использованием ДМЭ появилась в Канаде в 2010 г. [18]. В 2024 г. данная технология была запатентована компанией Shell [19]. В настоящее время число исследований в этом направлении возрастает, публикуются результаты математического и физического (кернового) моделирования закачки ДМЭ на разных типах месторождений и коллекторов, комбинирования паротеплового воздействия и закачки ДМЭ, полимерного заводнения и закачки ДМЭ. Данная тематика является совсем новой и в тоже время очень быстро развивается, чему во многом способствуют результаты моделирования и преимущества ДМЭ в сравнении с другими реагентами, предназначенными для повышения нефтеотдачи.

В настоящем обзоре проведен анализ особенностей технологии повышения нефтеотдачи с применением ДМЭ и перспектив ее развития.

### **Особенности диметилового эфира как реагента, применяемого для повышения нефтеотдачи**

Технологии повышения нефтеотдачи можно разделить на: тепловые (паротепловое воздействие, внутрипластовое горение, вытеснение нефти горячей водой, пароциклическая обработки скважин, электроразогрев пласта); газовые (закачка в пласт углеводородных газов, азота,  $\text{CO}_2$ ); химические (вытеснение нефти водными растворами полимеров, ПАВ, щелочей, ДМЭ) [20]. По способу нагнетания реагентов в пласт технология повышения нефтеотдачи с применением ДМЭ схожа с химическими методами воздействия, а по принципу вытеснения нефти — с закачкой в пласт легких углеводородов, однако имеется ряд отличий и преимуществ.

ДМЭ растворим в углеводородах и благодаря относительно высокому дипольному моменту (1.3 Д)

частично растворим в воде. Реализация технологии повышения нефтеотдачи с применением ДМЭ происходит следующим образом. В скважину подается раствор ДМЭ в воде концентрацией около 13 мольн. %. При контактировании с пластовым флюидом ДМЭ преимущественно переходит из водной фазы в углеводородную, что приводит к расширению последней и снижению ее вязкости [21, 22]. Эффект расширения и снижения вязкости способствует мобилизации остаточной нефти, заключенной в капиллярах породы, и вытеснению нефти водой к добывающей скважине [15–17]. В результате повышается коэффициент извлечения нефти. ДМЭ может быть регенерирован из нефтяной и водной фазы посредством испарения при снижении давления и использован повторно. Схематично технология повышения нефтеотдачи с применением ДМЭ приведена на рис. 1.

Использование ДМЭ имеет ряд преимуществ перед закачкой в пласт углеводородных газов и  $\text{CO}_2$  [16]. Во-первых, при равных количествах нагнетаемых в пласт ДМЭ,  $\text{CO}_2$  и углеводородных газов наибольшее увеличение объема нефти наблюдается в случае ДМЭ. Во-вторых, ДМЭ смешивается с нефтью при первом контакте, тогда как  $\text{CO}_2$  имеет ограниченную растворимость в нефти и смешивается с ней при первом контакте только при очень высоком давлении. В-третьих, ДМЭ, в отличие от углеводородных газов, не является парниковым газом. Раствор ДМЭ не вызывает коррозию, не токсичен. Помимо этого, ДМЭ имеет бóльшую растворимость в воде (выше 10 мольн. %), чем  $\text{CO}_2$  (1–2 мольн. %), что способствует более быстрому переходу ДМЭ фазы в углеводородную (вследствие большего градиента концентрации).

В работе [23] проведено математическое моделирование поведения ДМЭ и  $\text{CO}_2$  в пласте. Условием растворения  $\text{CO}_2$  в углеводородной фазе является высокое пластовое давление, которое превышает минимальное давление смешиваемости. Если  $\text{CO}_2$  не может раствориться в нефти, то ее вязкость не снижается. Вязкость нефти в случае закачки  $\text{CO}_2$  значительно снижается в области нагнетательной скважины, где происходит растворение  $\text{CO}_2$  в нефти. Однако в середине коллектора снижение вязкости нефти менее заметно, чем при нагнетании ДМЭ, поскольку ДМЭ легче растворяется в нефти. Поэтому нефтеотдача при нагнетании ДМЭ будет выше, чем при нагнетании  $\text{CO}_2$  в тот же коллектор.

Математическое и физическое моделирование характеристик смесей ДМЭ, пропана и бутана с битумом месторождения Атабаски [24] показало, что растворимость бутана в битуме немного больше, чем ДМЭ в битуме. Растворимость в битуме

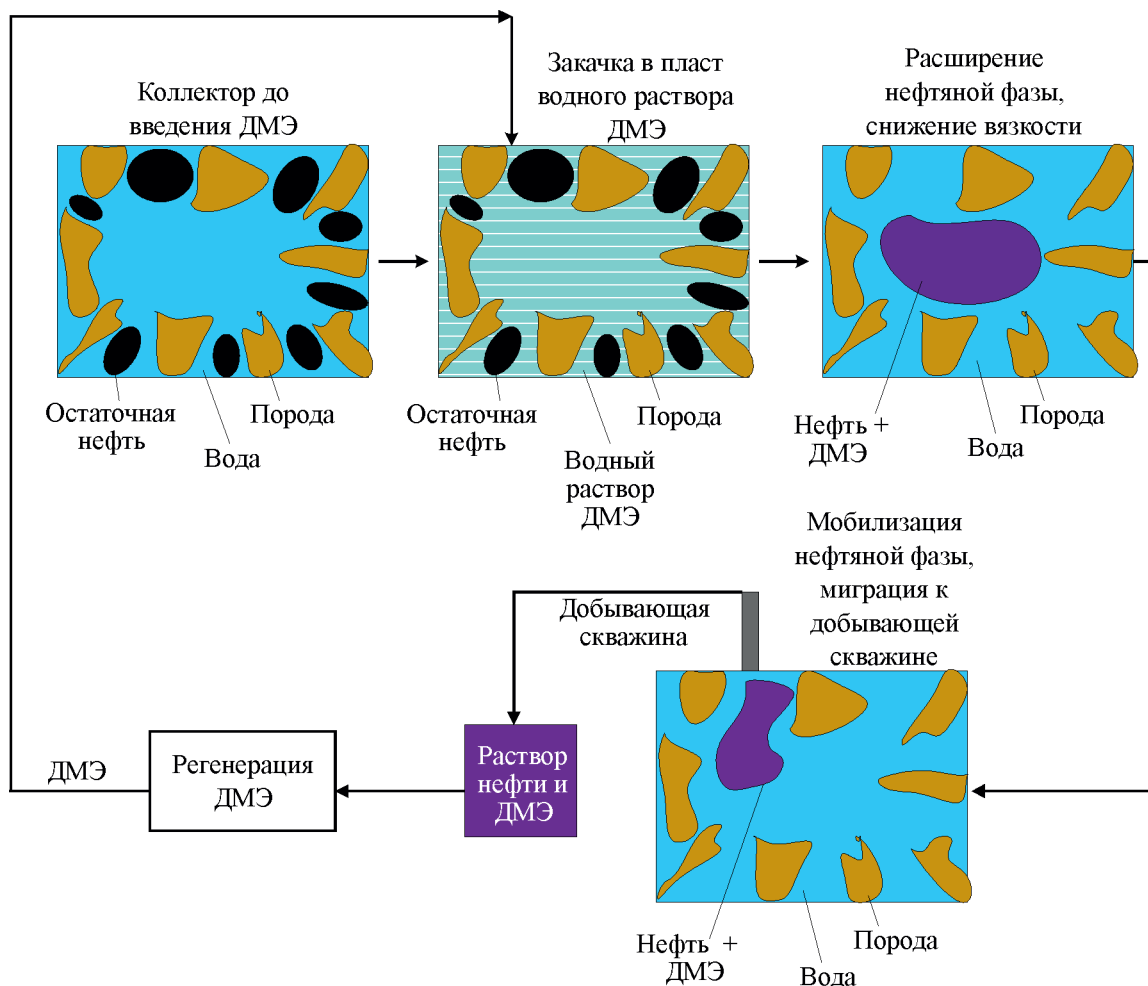


Рис. 1. Принцип технологии повышения нефтеотдачи путем закачки в пласт диметилового эфира.

пропана меньше, чем ДМЭ. Наименьшую вязкость и плотность демонстрируют смеси битума и бутана, промежуточную — смеси битума и ДМЭ, наибольшую — смеси битума и пропана. Таким образом, бутан обеспечивает наибольшее повышение нефтеотдачи. Тем не менее, с учетом других своих преимуществ ДМЭ, он может рассматриваться как замена углеводородных газов в технологиях повышения нефтеотдачи. Для того, чтобы оценить реальные перспективы применения ДМЭ на месторождениях, необходимо проанализировать при разных пластовых условиях особенности его поведения, в том числе распределение ДМЭ между водной и нефтяной фазами, коэффициент диффузии, снижение вязкости и плотности нефти и др.

#### Поведение диметилового эфира в пласте при различных условиях

При нагнетании в пласт ДМЭ основной механизм повышения нефтеотдачи, как уже отмечалось

ранее, заключается в расширении нефти и снижении ее вязкости. При этом растворение породы или изменение ее проницаемости не происходит [25]. Последнее особенно важно для карбонатных коллекторов, для которых растворение кальцита (основной породы) при использовании растворов кислот, щелочей или  $\text{CO}_2$  ведет к закупориванию пор и снижению нефтеотдачи. При всей очевидности механизма повышения нефтеотдачи при закачке ДМЭ, эффективность данной технологии для конкретного коллектора, как уже было сказано, будет определяться коэффициентом распределения ДМЭ между нефтяной и водной фазами: чем он больше, тем в большей степени ДМЭ переходит в нефтяную фазу, и тем значительно снижается вязкость нефти и тем более эффективно расходуется ДМЭ.

Коэффициент распределения ДМЭ между нефтяной и водной фазами напрямую связан с растворимостью ДМЭ в этих фазах. При повышении температуры и минерализации водной фазы растворимость ДМЭ в водной фазе снижается [17, 26, 27].

Так, при температуре 30°C растворимость ДМЭ в пресной воде составляет 12 моль/кг, в воде с минерализацией 20% — лишь 2 моль/кг. При температуре 80°C эти значения составляют соответственно 8 и 1 моль/кг [26]. Таким образом, при повышении температуры и/или минерализации водной фазы коэффициент распределения ДМЭ увеличивается, т. е. ДМЭ распределяется преимущественно в нефтяной фазе. Коэффициент распределения ДМЭ линейно снижается при увеличении концентрации ДМЭ в нефтяной фазе [28] (рис. 2). Повышение пластового давления ведет к снижению коэффициента распределения ДМЭ, однако влияние давления менее заметно, чем температуры [27, 28].

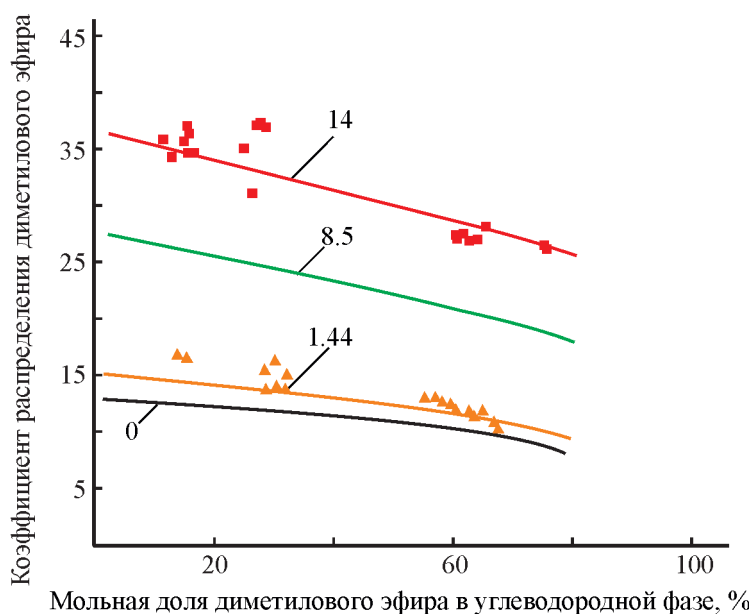
Очевидно, повышение концентрации ДМЭ в нефтяной фазе способствует снижению ее вязкости и плотности [17, 27, 29]. Отмечено [17], что при большем пластовом давлении и прочих равных условиях плотность и вязкость нефтяной фазы выше, чем при более низком давлении, вследствие уменьшения содержания в нефтяной фазе ДМЭ. Содержание ДМЭ в нефтяной фазе определяется коэффициентом диффузии ДМЭ в этой фазе, который зависит от температуры, давления, вязкости нефтяной фазы и концентрации в ней ДМЭ [30–32]. Повышение пластовой температуры способствует резкому увеличению коэффициента диффузии. Так, при увеличении температуры от 40 до 100°C коэффициент диффузии возрастает в 4 раза [30]. Повышение пластового давления приводит к снижению коэффициента диффузии. На коэффициент диффузии ДМЭ в значительной

степени влияет вязкость нефтяной фазы, которая, в свою очередь, также зависит от температуры, давления и содержания в ней ДМЭ [32]. В целом, чем выше вязкость нефтяной фазы, тем ниже коэффициент диффузии ДМЭ. Кроме того, коэффициент диффузии снижается при увеличении вязкости границы раздела нефтяной и водной фаз, которая, в свою очередь, увеличивается с пластовым давлением.

Благодаря полярности молекулы, ДМЭ в отличие от пропана или бутана, может растворять асфальтены, и его закачка в пласт не приводит к осаждению асфальтенов [33]. Данный факт важен при разработке месторождений тяжелых нефтей и природных битумов, отличающихся высоким содержанием асфальтенов. В случае закачки углеводородных газов или CO<sub>2</sub> в пласт наблюдается потеря коллоидной стабильности нефти, флокуляция и осаждение асфальтенов, закупоривание пор породы, что ведет к ослаблению притока нефти в добывающие скважины. В этой связи, особый интерес представляет применение ДМЭ при освоении месторождений высоковязких битуминозных нефтей, для которых ограничены возможности применения углеводородных газов и CO<sub>2</sub>.

### Сочетание закачки диметилового эфира с другими технологиями повышения нефтеотдачи

Высокая эффективность ДМЭ с точки зрения снижения вязкости и повышения подвижности неф-



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента распределения ДМЭ между нефтяной и водной фазами от минерализации водной фазы (см. цифры на кривых, мас. %) и концентрации ДМЭ в нефтяной фазе [28].

(разрешение от Elsevier на печать рисунка получено. Номер лицензии 5235920305140 от 25 января 2022 г.).



ти и, соответственно, повышения нефтеотдачи, обуславливают интерес к технологиям совместного использования ДМЭ и диоксида углерода, водяного пара, углеводородных газов и растворов полимеров для интенсификации добычи нефти.

*Закачка ДМЭ и диоксида углерода.* Закачка в пласт  $\text{CO}_2$  наиболее эффективна при условии достижения в пласте давления выше минимального давления смешиваемости. В этом случае  $\text{CO}_2$  растворяется в нефти, снижая ее вязкость и повышая подвижность. Данного давления не так легко достичь — начальное пластовое давление может быть намного ниже минимального давления смешиваемости. Кроме того,  $\text{CO}_2$  экстрагирует из нефти только легкие и средние компоненты, приводя к осаждению асфальтенов и закупориванию пор коллектора [34].

Совместная закачка  $\text{CO}_2$  и ДМЭ позволяет решить указанные проблемы. Как показано в результате физического ядерного моделирования [34], при совместной закачке в сланцевый коллектор  $\text{CO}_2$  и ДМЭ в мольном соотношении 85/15 наблюдается снижение поверхностного натяжения на границе раздела между нефтяной фазой и фазой  $\text{CO}_2$ –ДМЭ. Уменьшается вязкость нефтяной фазы в сравнении с закачкой только  $\text{CO}_2$ . Этот эффект объясняется тем, что ДМЭ повышает растворимость диоксида углерода в нефтяной фазе, т. е. уменьшает минимальное давление смешиваемости, а также улучшает массоперенос углеводородов из нефтяной фазы в фазу, обогащенную диоксидом углерода. В результате возрастает нефтеотдача в сравнении с закачкой только  $\text{CO}_2$  [35]. Отмечено [34], что сочетание закачки диоксида углерода и ДМЭ более эффективно, чем диоксида углерода и пропана или бутана, поскольку ДМЭ более эффективно повышает подвижность нефти, что способствует вовлечению в добычу остаточной нефти даже из мелких пор.

*Закачка водных растворов ДМЭ и полимеров.* Сочетание полимерного заводнения и нагнетания ДМЭ легко реализуемо, поскольку в этом случае флюид нагнетается в пласт в виде одного водного раствора, уже содержащего и ДМЭ, и полимеры. Результаты физического моделирования показывают, что ДМЭ дополнительно снижает вязкость нефти и повышает ее подвижность, по сравнению с закачкой только полимерного раствора. Это приводит к приросту нефтеотдачи [36, 37]. Вместе с тем, ДМЭ может снижать вязкость полимерного раствора, что нежелательно.

Наряду с увеличением подвижности нефти наблюдается стабилизация асфальтенов и предотвращается образование осадка. В то же время, присутствие полимера в нагнетаемом растворе способствует уменьшению содержания в пласте

остаточной нефти после закачки последней порции раствора. Благодаря совместной закачке полимера и ДМЭ уменьшается общая продолжительность добычи нефти из коллектора при увеличении коэффициента извлечения нефти.

*Закачка ДМЭ и паротепловое воздействие.* Паротепловое воздействие получило широкое распространение при добыче высоковязких нефтей и природных битумов. Одной из разновидностей паротеплового воздействия является метод парогравитационного дренажа (steam assisted gravity drainage — SAGD), при котором бурятся две горизонтальные скважины, одна из которых, верхняя — паронагнетательная, а вторая, нижняя — добывающая. При нагнетании водяного пара в пласте образуется паровая камера, вязкость нефти снижается, и она стекает вниз к добывающей скважине. Данная технология энергозатратна из-за высокого расхода водяного пара, поэтому ряд работ направлен на повышение коэффициента извлечения нефти и снижение расхода водяного пара. Для этого наряду с водяным паром может применяться закачка в пласт реагентов, снижающих вязкость природного битума, — углеводородных газов или диметилового эфира [38, 39].

Как показали результаты физического ядерного моделирования [38], совместная закачка водяного пара и ДМЭ позволяет повысить коэффициент извлечения нефти по двум причинам. Во-первых, в результате растворения ДМЭ в природном битуме снижается вязкость битума, увеличивается его объем и подвижность, что способствует стеканию битума вниз к добывающей скважине. Во-вторых, после закачки через нагнетательную скважину ДМЭ поднимается в верхнюю часть паровой камеры, сформированной в пласте водяным паром. В результате возрастает давление на нефтяную фазу, находящуюся ниже паровой камеры. Под действием этого давления битум стекает к добывающей скважине [39]. Таким образом, при закачке ДМЭ можно уменьшить расход водяного пара и повысить суммарное количество добытого природного битума. Следует также отметить, что, в отличие от углеводородных газов, ДМЭ в меньшей степени приводит к потере стабильности тяжелой нефти и осаждению асфальтенов в пласте и скважине.

В заключение стоит упомянуть возможность применения ДМЭ для переработки нефтешламов, которые образуются в том числе и при добыче нефти. В работах [40, 41] показана возможность применения жидкого ДМЭ для экстракции углеводородной фазы из нефтешламов. ДМЭ растворяет как воду, так и углеводороды, в результате чего разрушается водонефтяная эмульсия и происходит отделение

свободной воды. Растворение углеводородов в ДМЭ также способствует отделению механических примесей. В указанных работах исследовано влияние температуры экстракции, скорости и продолжительности перемешивания, соотношения ДМЭ/нефтьшлам на степень извлечения углеводородов и содержание углеводородов в твердом остатке. Данное направление безусловно является перспективным, и ДМЭ может рассматриваться как возможный растворитель при переработке нефтьшламов. Однако для этого требуется проведение дополнительных исследований.

### Выводы

Рост объемов мирового производства ДМЭ, его безопасность для человека и окружающей среды, возможность получения ДМЭ из возобновляемых углеродсодержащих ресурсов обуславливают интерес к его использованию в качестве реагента для добычи нефти. Этому способствуют высокая растворимость в углеводородах, эффективное снижение вязкости и повышение подвижности нефти, простота подачи в пласт с использованием имеющейся инфраструктуры месторождения. Закачка ДМЭ в пласт по эффективности соизмерима с закачкой углеводородных газов. Но в отличие от них ДМЭ не является парниковым газом и не приводит к осаждению асфальтенов. Последнее особенно важно при разработке месторождений тяжелых битуминозных нефтей. Поэтому можно отметить особую важность исследований ДМЭ как реагента для повышения нефтеотдачи на месторождениях тяжелых нефтей, в сочетании с технологиями SAGD, закачки диоксида углерода.

Тематика интенсификации добычи нефти с применением ДМЭ является новой, существующих исследований в данной области явно недостаточно для начала промышленной реализации технологии. Очевидно, необходимо проведение сравнительных исследований эффективности добычи нефти с применением ДМЭ в коллекторах разных типов: с разной поровой структурой, различающихся вязкостью нефти, нефтенасыщенностью, долей водной фазы и ее минерализацией. Важно также изучение безвозвратных потерь ДМЭ в пласте, что позволит оценить долю регенерируемого ДМЭ и экономическую эффективность такой технологии добычи нефти. Также в дальнейшем будут иметь большое значение исследования, посвященные масштабированию ядерного моделирования до реальных участков месторождений.

### Конфликт интересов

А.Л. Максимов заявляет, что является главным редактором журнала «Петролеомика». Н. Н. Петрухина заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХС РАН.

### Информация об авторах

*Петрухина Наталья Николаевна*, к.т.н.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6125-902X>

*Максимов Антон Львович*, д.х.н., член-корреспондент РАН,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-4950>

### Список литературы

1. The dimethyl ether market is projected to grow from \$4,363.9 million in 2021 to \$8,755.17 million in 2028 at a CAGR of 10.5% during forecast period 2021-2028 // <https://www.fortunebusinessinsights.com/dimethyl-ether-market-104309> (дата обращения 12.01.2022 г.).
2. Top 10 Players in the Global Dimethyl Ether (DME) Industry // <https://www.imarcgroup.com/dimethyl-ether-manufacturers> (дата обращения 12.01.2022 г.).
3. *Снатенкова Ю. М., Колесниченко Н. В., Матиева З. М., Максимов А. Л.* Конверсия диметилового эфира в углеводороды бензинового ряда на наноразмерных цеолитных катализаторах: влияние природы модификатора // *Наногетерогенный катализ*. 2019. Т. 4. № 2. С. 143–148. <https://doi.org/10.1134/S2414215819020114> [*Snatenkova Y. M., Kolesnichenko N. V., Matieva Z. M., Maximov A. L.* Dimethyl ether conversion to gasoline hydrocarbons over nanosized zeolite catalysts: Effect of modifier nature // *Petrol. Chemistry*. 2019. V. 59. N 12. P. 1331–1336. <https://doi.org/10.1134/S0965544119120119>].
4. *Колесникова Е. Е., Обухова Т. К., Колесниченко Н. В., Бондаренко Г. Н., Арапова О. В., Хаджиев С. Н.* Особенности модифицирования цеолитного катализатора конверсии диметилового эфира в олефины соединениями Mg при ультразвуковой обработке // *Нефтехимия*. 2018. Т. 58. № 5. С. 573–579. <https://doi.org/10.1134/S0028242118050209> [*Kolesnikova E. E., Obukhova T. K., Kolesnichenko N. V., Bondarenko G. A., Arapova O. V., Khadzhiev S. N.* Ultrasound-assisted modification of zeolite catalyst for dimethyl ether conversion to olefins with magnesium compounds // *Petrol. Chemistry*. 2018. V. 58. N 10. P. 863–868. <https://doi.org/10.1134/S0965544118100201>].

5. Волнина Э. А., Кипнис М. А., Хаджиев С. Н. Каталитическая химия диметилового эфира (обзор) // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 3. С. 243–262. <https://doi.org/10.7868/S0028242117030133> [Volnina E. A., Kipnis M. A., Khadzhiev S. N. Catalytic chemistry of dimethyl ether (review) // Petrol. Chemistry. 2017. V. 57. N 3. P. 243–262. <https://doi.org/10.1134/S0965544117050139>].
6. Хаджиев С. Н., Ежова Н. Н., Яшина О. В. Катализ в дисперсной фазе: slurry-технология в синтезе диметилового эфира (обзор) // Наногетерогенный катализ. 2017. Т. 2. № 1. С. 3–22. <https://doi.org/10.1134/S241421581701004X> [Khadzhiev S. N., Ezhova N. N., Yashina O. V. Catalysis in the dispersed phase: Slurry technology in the synthesis of dimethyl ether (Review) // Petrol. Chemistry. 2017. V. 57. N 1. P. 553–570. <https://doi.org/10.1134/S0965544117070040>].
7. Azizi Z., Rezaeimanesh M., Tohidian T., Rahimpour M. R. Dimethyl Ether: a review of technologies and production challenges // Chem. Engineering and Processing. 2014. V. 82. P. 150–172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2014.06.007>
8. Хаджиев С. Н., Максимов А. Л., Кротова М. В. Производство диметилового эфира: цель и возможности организации в России с учетом геополитического фактора // Научный журнал Российского газового общества. 2017. № 1. С. 43–53.
9. Кипнис М. А., Белостоцкий И. А., Волнина Э. А., Лин Г. И., Маршнев И. И. Синтез диметилового эфира из синтез-газа на катализаторах с цеолитами ZSM-5 // Кинетика и катализ. 2018. Т. 59. № 6. С. 715–727. <https://doi.org/10.1134/S0453881118060102> [Kipnis M. A., Belostotskii I. A., Volnina E. A., Lin G. I., Marshev I. I. Synthesis of dimethyl ether from syngas on the catalysts with the ZSM-5 zeolites // Kinetics and Catalysis. 2018. V. 59. N 6. P. 754–765. <https://doi.org/10.1134/S0023158418060071>].
10. Косова Н. И., Курина Л. Н., Шильяева Л. П. Синтез диметилового эфира из CO и H<sub>2</sub> // Журнал физической химии. 2011. Т. 85. № 7. С. 1246–1250 [Kosova N. I., Kurina L. N., Shilyaeva L. P. Synthesis of dimethyl ether from CO and H<sub>2</sub> // Russ. J. Phys. Chem. A. 2011. V. 85. N 7. P. 1140–1144. <https://doi.org/10.1134/S0036024411070168>].
11. Мусич П. Г., Курина Л. Н., Восмериков А. В. Катализаторы прямого получения диметилового эфира из синтез-газа // Катализ в промышленности. 2014. № 6. С. 33–37.
12. Wu T.-W., Chien I.-L. A novel energy-efficient process of converting CO<sub>2</sub> to dimethyl ether with techno-economic and environmental evaluation // Chem. Engineering Research and Design. 2022. V. 177. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.013>
13. Arcoumanis C., Bae C., Crookes R., Kinoshita E. The potential of dimethyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review // Fuel. 2008. V. 87. N 7. P. 1014–1030. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.007>
14. Park S. H., Lee C. S. Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel // Energy Conversion and Management. 2014. V. 86. P. 848–863. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.051>.
15. Pratama R. A., Babadagli T. A review of the mechanics of heavy-oil recovery by steam injection with chemical additives // J. of Petrol. Science and Engineering. 2022. V. 208. Article 109717. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109717>
16. Javanmard H., Seyyedi M., Jones S. A., Nielsen S. M. Dimethyl ether enhanced oil recovery in fractured reservoirs and aspects of phase behavior // Energy Fuels. 2019. V. 33. P. 10718–10727. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02600>
17. Chernetsky A., Masalmeh S., Eikmans D., Boerrigter P. M., Fadili A., Parsons C. A., Parker A., Boersma D. M., Cui J., Dindoruk B., Te Riele P. M., Alkindi A., Azri N. A novel enhanced oil recovery technique: experimental results and modelling workflow of the DME enhanced waterflood technology // Abu Dhabi Intern. Petrol. Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 9–12 November 2015. SPE-177919-MS.
18. Canadian patent application N 2 652 930. In-situ recovery of bitumen or heavy oil by injection of dimethyl ether. 2010.
19. Patent US application N 2014/0360719. Enhanced oil recovery method. 2014.
20. Burrows L. C., Haeri F., Cvetcic P., Sanguinito S., Shi F., Tapriyal D., Goodman A., Enick R. M. A literature review of CO<sub>2</sub>, natural gas, and water-based fluids for enhanced oil recovery in unconventional reservoirs // Energy Fuels. 2020. V. 34. P. 5331–5380. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03658>
21. Chahardowli M., Farajzadeh R., Masalmeh S. K., Mahani H., Bruining H. A novel enhanced oil recovery technology using dimethyl ether/brine: spontaneous imbibition in sandstone and carbonate rocks // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai. UAE, 26–28 September 2016. SPE-181340-MS
22. Cui J., Qi Y., Dindoruk B. Measurement of transport properties and densities of dimethyl ether dme and water/brine mixtures // SPE Improved Oil Recovery Conference. Tulsa. OK. USA, 18 – 22 April 2020. SPE-200314-MS
23. Cho J., Kim T. H., Lee K. S. Compositional modeling and simulation of dimethyl ether (DME)-enhanced waterflood to investigate oil mobility improvement // Petrol. Science. 2018. V. 15. P. 297–304. <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0212-z>
24. Haddadni A., Azinfar B., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J. Thermophysical properties of dimethyl ether/Athabasca bitumen system // Can. J. Chem. Eng. 2018. V. 96. P. 597–604. <https://doi.org/10.1002/cjce.23009>
25. Javanmard H., Seyyedi M., Nielsen S. M. On oil recovery mechanisms and potential of DME–brine injection in the North Sea Chalk oil reservoirs // Ind. Eng. Chem. Res. 2018. V. 57. P. 15898–15908. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04278>



26. *Parsons C., Chernetsky A., Eikmans D., te Riele P., Boersma D., Sersic I., Broos R.* Introducing a novel enhanced oil recovery technology // SPE Improved Oil Recovery Conference. Tulsa. Oklahoma. USA, 11–13 April 2016. SPE-179560-MS
27. *Ratnakar R. R., Dindoruk B., Wilson L.* Use of DME as an EOR agent: Experimental and modeling study to capture interactions of DME, brine and crudes at reservoir conditions // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai. UAE, 26–28 September 2016. SPE-181515-MS
28. *Ratnakar R. R., Dindoruk B., Wilson L.* Experimental investigation of DME–water–crude oil phase behavior and PVT modeling for the application of DME-enhanced waterflooding // *Fuel*. 2016. V. 182. P. 188–197.
29. *Abdi M., Yamchi H. S., Zirrahi M., Hassanzadeh H.* Cubic-plus-association equation of state parameterization of liquid-liquid equilibrium of propane + *n*-butane + bitumen and dimethyl ether + bitumen systems // *Fluid Phase Equilibria*. 2022. V. 554. Article 113341. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2021.113341>
30. *Khalifi M., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J.* Measurements of the molecular diffusion coefficient of dimethyl ether in water at  $T = (313.15–373.15 \text{ K})$  and  $P = (0.69–2.76 \text{ MPa})$  // *J. Chem. Eng. Data*. 2021. V. 66. P. 2754–2763. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00166>
31. *Khalifi M., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J.* Measurements of molecular diffusion coefficient and solubility of dimethyl ether in bitumen at  $T = (323.15–383.15 \text{ K})$  and  $P = (0.69–2.76 \text{ MPa})$  // *J. Chem. Eng. Data*. 2019. V. 64. P. 5935–5945. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00763>
32. *Khalifi M., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J.* Concentration-dependent molecular diffusion coefficient of dimethyl ether in bitumen // *Fuel*. 2020. V. 274. Article 117809. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117809>
33. *Yamchi H. S., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J.* Measurements and NRTL modeling of liquid-liquid equilibrium of dimethyl ether/bitumen // *Fluid Phase Equilibria*. 2020. V. 512. Article 112549. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112549>
34. *Kong S., Feng G., Liu Y., Li K.* Potential of dimethyl ether as an additive in CO<sub>2</sub> for shale oil recovery // *Fuel*. 2021. V. 296. Article 120643. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120643>
35. *Lee Y. W., Lee H. S., Jeong M. S., Cho J., Lee K. S.* Compositional modeling of dimethyl ether–CO<sub>2</sub> mixed solvent for enhanced oil recovery // *Appl. Sci*. 2021. V. 11. P. 406. <https://doi.org/10.3390/app11010406>
36. *Chahardowli M., Farajzadeh R., Bruining H.* Experimental investigation of the use of the dimethyl ether/polymer hybrid as a novel enhanced oil recovery method // *J. of Industrial and Engineering Chemistry*. 2016. V. 38. P. 50–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2016.04.008>
37. *Chahardowli M., Farajzadeh R., Bruining H.* Experimental investigation of dimethyl ether/polymer hybrid as an enhanced oil recovery method // SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia held in Muscat. Oman, 21–23 March 2016. SPE-179850-MS
38. *Haddadnia A., Zirrahi M., Hassanzadeh H., Abedi J.* Dimethyl ether—a promising solvent for ES-SAGD // SPE Canada Heavy Oil Technical Conference held in Calgary. Alberta. Canada, 13–14 March 2018. SPE-189741-MS.
39. *Huang J., Babadagli T.* Efficiency improvement of heavy-oil recovery by steam-assisted gravity drainage injection using new generation chemicals // *Energy Fuels*. 2020. V. 34. P. 4433–4447. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00208>
40. *Zhang D., Huang Y., Oshita K., Takaoka M., Ying M., Sun Z., Sheng C.* Crude oil recovery from oily sludge using liquefied dimethyl ether extraction: a comparison with conventional extraction methods // *Energy Fuels*. 2021. V. 35. P. 17810–17819. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02498>
41. *Mu B., Zhu W., Zhong J., Chen L., Lin N., Wang C., Chen S., Li Z.* Mechanism of separation and removal of water from oily sludge using liquid dimethyl ether to dissolve hydrocarbons // *Chemosphere*. 2021. V. 279. Article 130452. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130452>