



Дэвид Сорин
EOR Solvay, компания-участник
лидирующего в мире EOR Alliance®
Вице-президент
david.sorin@solvay.com

Проектирование оптимальных химических процессов повышения нефтеотдачи

Химические методы повышения нефтеотдачи открывают многообещающие перспективы увеличения добычи и запасов на нефтяных месторождениях поздней стадии разработки. Однако при внедрении этих методов на месторождении существует множество факторов, которые могут привести к возникновению технических проблем или экономической неэффективности проекта. EOR Alliance® рекомендует использовать поэтапный подход к снижению рисков в таких проектах; этот подход опирается на широкий ассортимент специализированных химических веществ и возможности уникальных лабораторий

Ключевые слова: МУН; пилотный проект; поверхностно-активные вещества; скрининг; моделирование

Е OR Alliance® был организован в 2010 г. и опирается на более чем 30-летний опыт его участников в области методов повышения нефтеотдачи: IFPEN (ранее – Французский институт нефти) – научно-исследовательского геолого-геофизического института; компании Veicip-Franlab оказывающей консалтинговые услуги в области поисково-

разведочных работ, разрабатывающей и использующей программное обеспечение для моделирования; компании Solvay – транснациональной химической компании.

Участники Alliance® признают, что для преодоления технических и организационных проблем, возникающих при реализации МУН, необходимо было принять подход, снижающий риски (**рис. 1**) и поддерживаемый

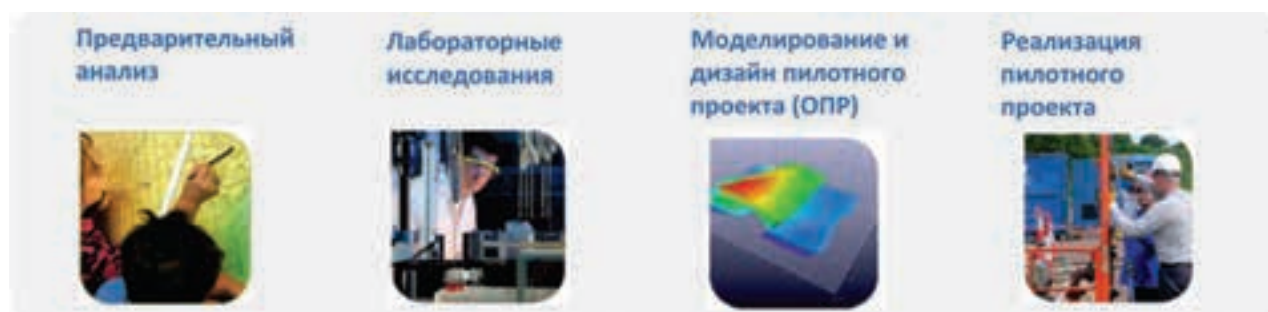


Рис. 1.
Поэтапный подход к выполнению проектов МУН со снижением рисков

полной и органичной интеграцией взаимодополняющих возможностей техники пластовых исследований, химии и наук о Земле. Такой поэтапный подход предполагает постепенную мобилизацию ресурсов и на протяжении перечисленных ниже четырех этапов придерживается целостного представления о проекте МУН:

- предварительные технико-экономические исследования: их цель состоит в подтверждении пригодности процесса МУН путем использования постепенно усложняющихся современных методов качественной оценки;
- лабораторные изыскания: решают задачу выбора оптимальной химической системы и стратегии закачки;
- моделирование и проектирование опытно-производственных работ: предназначены для оценки предполагаемых экономических показателей МУН в масштабе месторождения на основе результатов лабораторных экспериментов, а также для выбора стратегии пилотного проекта;
- реализация пилотного проекта: осуществляется на месторождении с целью про-

верки правильности результатов, спрогнозированных на основе лабораторных работ и моделирования.

Ниже освещаются некоторые наиболее важные аспекты этого поэтапного процесса, а также отличительные возможности, реализованные благодаря деятельности *EOR Alliance*®.

Предварительное технико-экономическое исследование

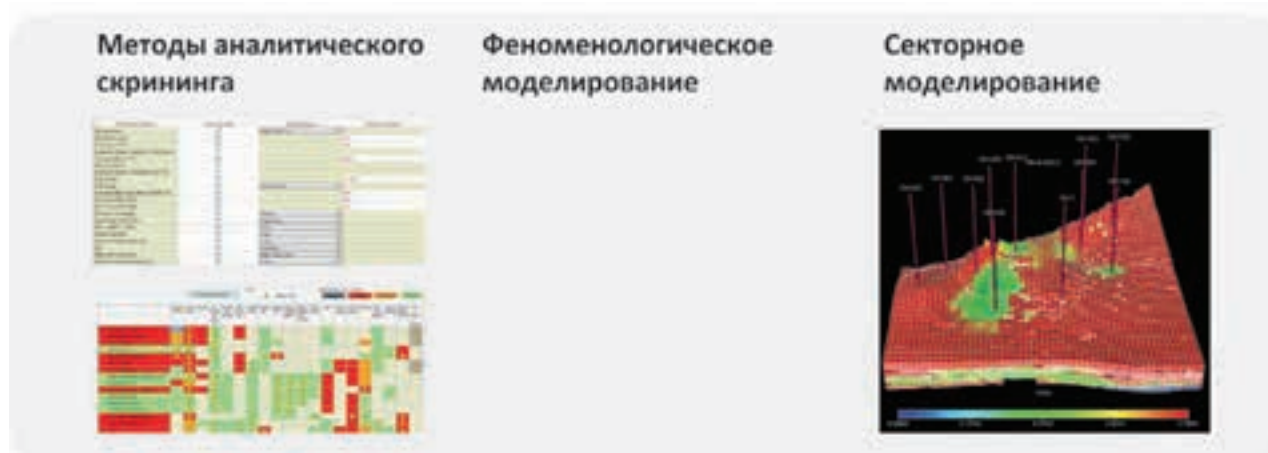
Процесс отбора (скрининга) включает три независимых этапа (*рис. 2*) разной продолжительности:

- скрининг и ранжирование процесса с использованием аналитических инструментов;
- ранжирование на основе обобщенного секторного моделирования (феноменологическое моделирование);
- детальное секторное моделирование с использованием уточненной модели месторождения.

Скрининг и аналитические инструменты

Первый высокоуровневый скрининг выполняется на основании параметров залежи.

Рис. 2.
Инструменты, используемые в предварительных технико-экономических исследованиях



Этот начальный подход дополняется аналитическими оценками.

Например, в модели заводнения полимерным ПАВ для прогнозирования добычи нефти используются корреляционные связи, полученные по результатам численного моделирования. На основании теории движения отдельных фаз в многофазном потоке определяются фронт нефти, прорыв ПАВ и период полной реализации проекта. Коэффициент Ковалея, основанный на коэффициенте Дикстра-Парсонса (1950), используется для учета влияния неоднородности коллекторов на скорости продвижения ПАВ и фронта нефти. Суммарная эффективность извлечения нефти определяется произведением эффективности 1D вытеснения (*зависит от капиллярного числа, проницаемости, глубины и расстояния между скважинами*), охвата заводнением ПАВ по мощности пласта (*зависит от объема порции закачки ПАВ, адсорбции ПАВ и неоднородности пласта*) и области охвата полимерным заводнением (*зависит от объема порции закачки полимера и коэффициента охвата по мощности*). Эта суммарная эффективность извлечения корректируется с учетом влияния перетоков.

Феноменологическое моделирование

После выбора наиболее перспективных процессов МУН выполняется феноменологическое моделирование, предназначенное для лучшего понимания физики МУН, точной настройки рейтинга и получения некоторых

начальных экономических оценок. Для этих целей создаются обобщенные секторные модели со следующими входными параметрами: предварительно заданная форма модели (доступно несколько форм), корреляция свойств флюидов, корреляция фазовых проницаемостей, распространение пористости и проницаемости в ячейках при помощи геостатистики. Этот подход способствует быстрой предварительной оценке разных сценариев МУН, включая количественный анализ и расчеты профилей добычи.

Моделирование в секторных моделях

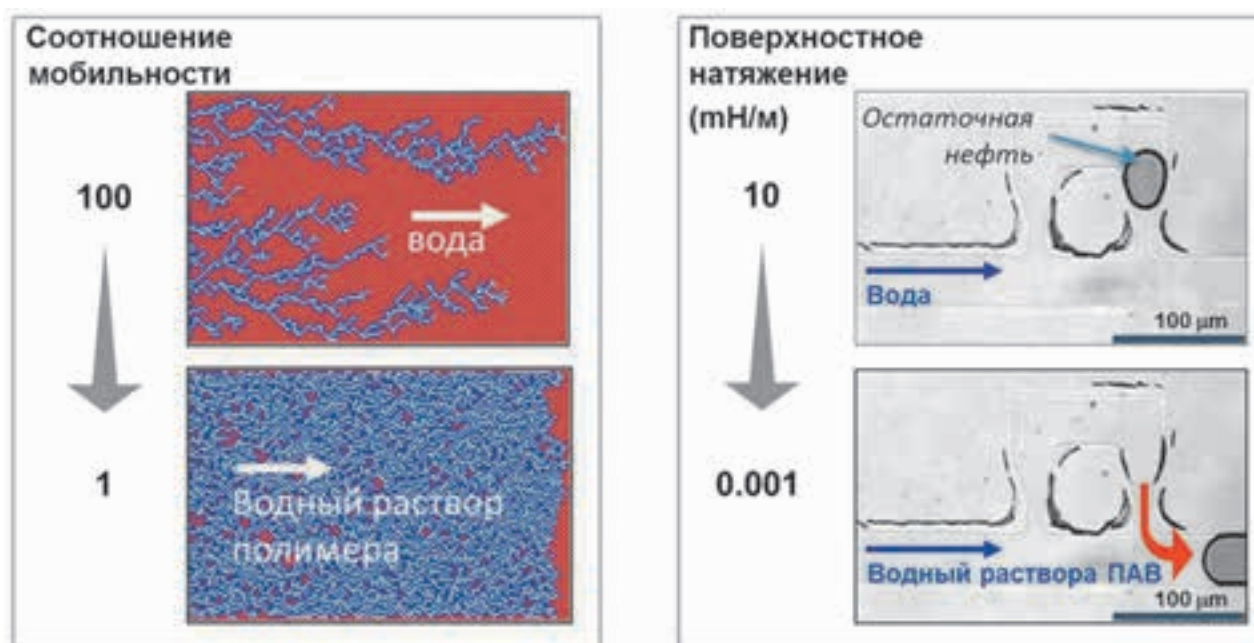
Наконец, для рассматриваемого пилотного участка выполняется моделирование в секторной модели. Секторная модель извлекается из текущей гидродинамической модели, уточняется, инициализируется и адаптируется. В отсутствие результатов лабораторных исследований для выполнения начального моделирования и анализа чувствительности к основным неопределенностям залежи (например, кривая капиллярного вытеснения, проницаемость) и для осуществления процесса в масштабе лабораторного эксперимента (например, межфазное натяжение, адсорбция) используются предположения/допущения. Эта пилотная секторная модель будет обновляться по мере поступления новых лабораторных данных.

Лабораторные исследования

Основы

Химические методы МУН предназначены для обеспечения подвижности целикков остаточной нефти в пласте или нефти, удержива-

Рис. 3.
Иллюстрация основ химических МУН на микромоделях собственной разработки



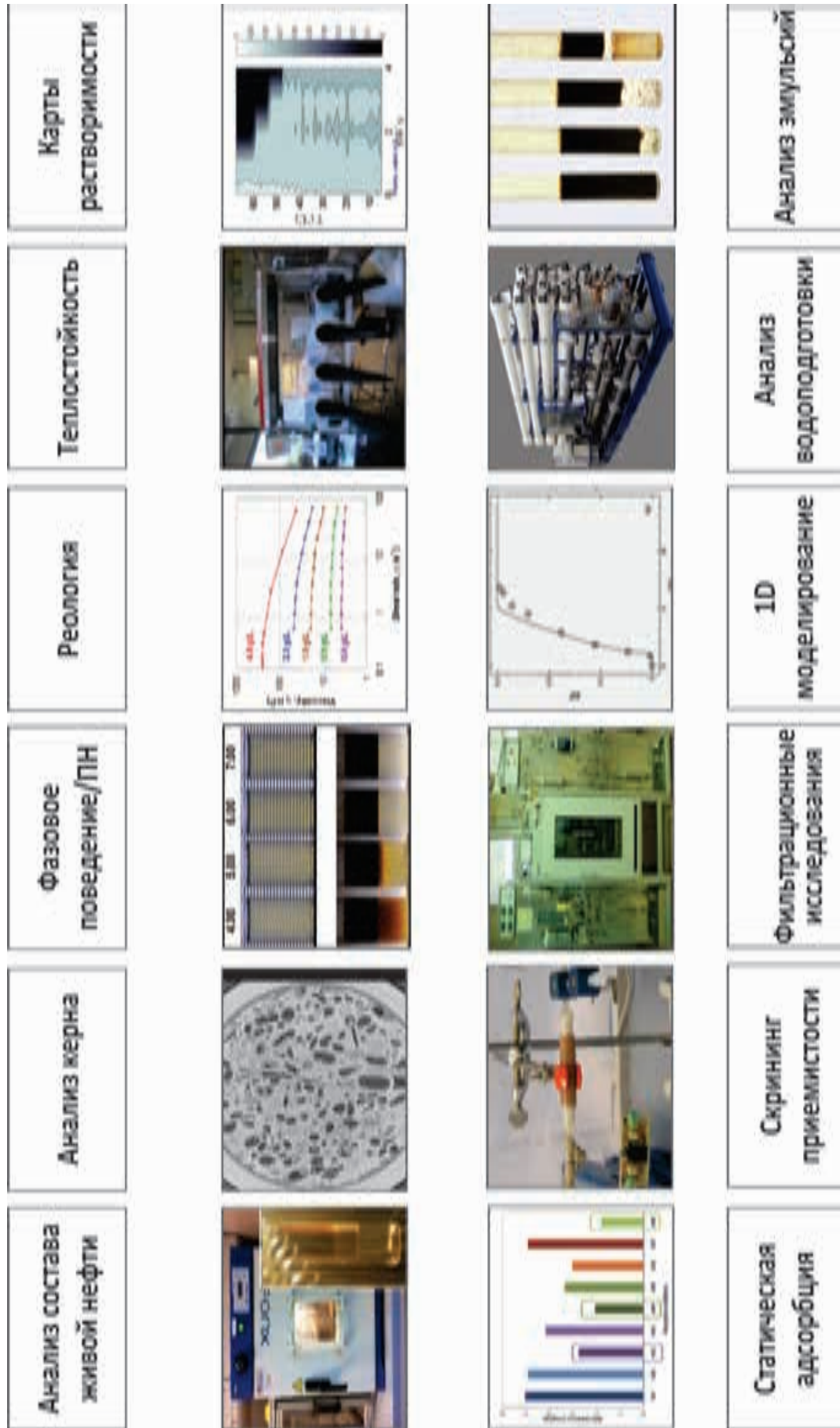


Рис. 4.
Необходимый спектр возможностей скрининга

емой капиллярными силами. Это достигается использованием двух взаимодополняющих химических реагентов: полимеров, которые повышают коэффициент подвижности воды относительно нефти и способствуют извлечению целикров нефти, и ПАВ, которые снижают межфазное натяжение в системе вода–нефть и способствуют высвобождению нефти, удерживаемой капиллярными силами (*рис. 3*).

В то время как частично гидролизованый полиакриламид считается наилучшим реагентом для «стандартных» полевых условий, в проектах МУН могут применяться тысячи различных видов молекул ПАВ, а наибольшая эффективность обычно достигается при совместном воздействии комбинации («состава») из нескольких видов молекул ПАВ. Кроме того, количество параметров, оказывающих влияние на выбор этих синергетических смесей, очень велико, и значение этих параметров в неоднородных коллекторах может варьировать. Это имеет большое значение для ассортимента ПАВ и возможностей лабораторий, которые требуются для проектирования оптимальных составов ПАВ.

Ассортимент ПАВ

Со стороны химии ПАВ, для комбинирования должен быть доступен широкий спектр видов молекул – как с точки зрения семейств ПАВ (например, алкилбензольные ПАВ, олефиновые ПАВ, алкил-глицериновые эфиры, карбоксилаты, бетаины, сульфобетаины и т.д.), так и с точки зрения конкретных веществ в рамках этих семейств. Например, при лабораторных исследованиях для *Alliance* доступны более 20 различных ПАВ на основе алкил-глицериновых эфиров, и в целом более 150 различных видов молекул, что позволяет создавать тысячи возможных их комбинаций.

Поскольку рынок ПАВ для МУН по-прежнему находится на ранней стадии развития, в настоящее время большинство этих продуктов не производится в промышленных масштабах, и применение в лабораторных исследованиях подразумевает возможность синтезировать их на месте. В рамках *Alliance*® компания *Solvay* задействует множество лабораторий, синтезирующих ПАВ, а также своих экспертов-технологов. Они обеспечивают синтез продуктов в типичных для отрасли условиях, и для поддержки осуществления проектов эти процессы можно многократно воспроизводить в большем масштабе, при низких затратах и в короткие сроки.

Лабораторные средства

Отправной пункт всех лабораторных исследований химических МУН – определение

диапазона характерных условий месторождения для безошибочной оценки пригодности химических веществ. Чтобы правильно проанализировать неоднородности коллекторов (например, горных пород, пластовой нефти), применяется обширная экспериментальная база, например, ячейки под давлением, компьютерная томография, дифракционный рентгеноструктурный анализ, а также другие способы анализа воды и нефти.

Поскольку эффективность ПАВ может существенно зависеть от изменения множества параметров (температуры, состава нефти, состава воды и пр.), для подбора оптимального состава и проверки его поведения в неоднородных пластовых условиях требуется огромное количество экспериментов. На практике невозможно выполнить такое множество экспериментов вручную, и существует большой риск выбрать либо неоптимальные составы, либо составы, неспособные выдержать реальные неоднородности в пластовых условиях.

Для преодоления этих ограничений в *Alliance*® разработаны серии быстрых автоматизированных поточных схем, способствующих выбору оптимальных составов ПАВ с низким межфазным натяжением и хорошей растворимостью из сотен сочетаний, в тысячах условий, представляющих неоднородности пласта (например, вода, нефть, температура и пр.). Это стало возможным благодаря взаимодополняющим специальным возможностям физической химии, робототехники, микро-пневмогидроструйной техники, регистрации изображений и обработки данных, которые с 2004 г. объединены в «Лаборатории будущего» компании *Solvay* с целью разработки инновационных высокопроизводительных экспериментальных платформ. Основные характеристики нашей поточной схемы описаны в нескольких публикациях (например, SPE113705).

Долговременная теплостойкость, реологические характеристики, скорость закачки и адсорбция («потеря» химических веществ) – важные критерии оценки составов. Снижение адсорбции – вопрос, требующий повышенного внимания, поскольку несомненно, что стратегии снижения этих «потерь» химических веществ оказывают непосредственное влияние на стоимость химических процессов МУН. Наши недавние исследования показали, что при тщательно спроектированных стратегиях, включая использование ингибиторов (рассматривается вопрос о выдаче патента), адсорбцию можно снизить более чем на 50%.

Наконец, фильтрационные исследования, выполненные в представительных пластовых условиях, используются для проверки приемистости, определения извлечения нефти и измерения адсорбции в пористой среде. Обычно они проводятся с использованием сырой дегазированной нефти, но на более поздних этапах исследования могут быть предусмотрены также и с использованием живой нефти с тем, чтобы максимально приблизиться к пластовым условиям. Эти эксперименты занимают много времени, они затратны и требуют большого опыта для получения значимых данных. Моделирование фильтрационных исследований в специализированных программах, таких как *PumaFlow*®, – это важный шаг в направлении представительного моделирования в масштабах пилотного проекта и месторождения в целом.

Извлекаемые флюиды

Последний аспект нашего подхода к снижению рисков связан с потенциальным влиянием химических веществ МУН, извлекаемых вместе с продуктом. Это касается всей технологической цепочки, включая первичное разделение нефти, воды и газа, а также сопутствующие процессы обработки воды. Хотя ПАВ, используемые в процессах МУН, преимущественно водорастворимые, они могут распределяться между водной и нефтяной фазами. Это зависит от взаимодействия с естественными ПАВ нефти, например, асфальтенами или нафтеновыми кислотами. Что касается полимеров, проблемы повышения вязкости водной фазы находятся под значительным влиянием концентрации и физического состояния добываемых вместе с продуктом полимеров (молекулярный вес и степень гидролиза), которые могут подвергаться частичной деструкции (под влиянием механических, тепловых и/или химических факторов).

В *EOR Alliance*® создан целый ряд экспериментальных установок для моделирования

основных процессов обработки воды и оценки рисков, связанных с МУН. В их числе тесты для подбора деэмульгаторов и очистителей воды, центрифугирование, газовый барботаж, лабораторные эксперименты по мембранной фильтрации. В самых сложных ситуациях для тестирования оборудования, уже используемого на месторождении, может также применяться полупромышленная установка разделения газа, нефти и воды (*GOWSP*).

Выводы и перспективы крупномасштабного внедрения

Химические методы повышения нефтеотдачи открывают многообещающие перспективы увеличения добычи и запасов на нефтяных месторождениях поздней стадии разработки. Однако при внедрении этих методов на месторождении существует множество факторов, которые могут привести к возникновению технических проблем или экономической неэффективности проекта. *EOR Alliance*® рекомендует использовать поэтапный подход к снижению рисков в таких проектах; этот подход опирается на широкий ассортимент специализированных химических веществ и возможности уникальных лабораторий.

За рамками исследований и пилотных проектов крупномасштабное внедрение химических МУН встречает и промышленные затруднения, такие как доступность химических реагентов в нужных количествах и требования экономической эффективности. Потребности крупномасштабной реализации уникальны по масштабам для отрасли в отношении ПАВ и, в меньшей степени, в отношении полимеров. Они потребуют создания дополнительных производственных мощностей, обеспечивающих взаимовыгодные соглашения между операторами и поставщиками химреагентов. ❧

UDC 622.276: 661.185

David SORIN, Vice-President EOR Solvay and member of global leadership team, EOR Alliance®, david.sorin@solvay.com

Designing optimal chemical EOR processes

Abstract. Chemical EOR offers promising perspectives for increasing production and reserves in mature oil fields. Many challenges, however, can lead to technical or economical failures in field applications. The EOR Alliance® recommends a phased approach to de-risking these projects, supported by a portfolio of differentiated chemicals and unique laboratory capabilities. Beyond studies and pilots, large-scale implementation of chemical EOR involves additional industrial hurdles such as the availability of chemicals in required quantities, and in cost-efficient conditions. These large-scale deployments are unique in scale in the surfactant and, to a lesser extent, polymer industries, and will require additional production capacity to be built, with potential for win-win agreements between operators and chemical suppliers.

Keywords: EOR; pilot project; surfactants; screening; modeling