А.Е.ВОРОБЬЕВ, А.Д.ГЛАДУШ, Т.В.ЧЕКУШИНА
Российский университет дружбы народов

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ИСКУССТВЕННУЮ НЕФТЬ В ЛИТОСФЕРНЫХ РЕАКТОРАХ КАК ФАКТОР ПРЕОДОЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО КРИЗИСА

С ростом численности населения нашей планеты неуклонно возрастает и степень негативного воздействия на биосферу. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, все больше добывается полезных ископаемых, заготавливается растительной и животной продукции, используется природных вод для производственных, жилищно-бытовых и сельскохозяйственных целей (табл.1), вовлекается в сельскохозяйственный оборот мелиорированных земель, строится городов и населенных пунктов, производственных помещений и т.д., с другой стороны, хозяйственная деятельность человечества неуклонно сопровождается ростом объемов различного рода отходов производства и городского коммунального хозяйства, которые существенно загрязняют природную среду. Например, такие компоненты как мусор, отходы и отбросы в мировом масштабе накапливаются в количестве более 20^{10} т в год.

Динамика численности населения земного шара:

Период	8000 лет до н.э.	I в н.э.	1000 год	1500 год	1800 год	1900 год
Численность населения, млн чел.	Около 6	Около 255	Около 254	460	954	1633
Период	1950 год	1990 год	2000 год	2025 год	2050 год	
Численность населения, млн чел.	3833	5515	6061	8504	10019	

Таблица 1

Динамика сброса сточных вод в поверхностные водоемы РФ

Показатели	Годы						
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Сброс сточных вод в целом							
Абсолютный, $м^3$	73,2	70,6	68,2	60,2	59,9	59,3	55,7
На единицу ВВП, $м^3$/100$	4,6	5,22	5,47	5,56	5,78	5,93	6,03
Сброс всех видов загрязненных сточных вод							
Абсолютный, $м^3$	28	27,1	27,2	24,6	24,5	23	22
На единицу ВВП, $м^3$/$	1,76	2	2,19	2,27	2,36	2,3	2,51
Сброс сточных вод без очистки							
Абсолютный, $м^3$	8,4	8,2	8,5	6,9	6,6	6,8	6,2
На единицу ВВП, $м^3$/$	0,53	0,61	0,68	0,64	0,64	0,68	0,67
Сброс недостаточно очищенных сточных вод							
Абсолютный, $м^3$	19,6	19	18,7	17,7	17,9	16,2	15,8
На единицу ВВП, $м^3$/$	1,23	1,4	1,5	1,63	1,73	1,62	1,75

Таблица 2

Распределение потребляемой в мире энергии по видам топлива, %

Топливо	1995 г.	2000 г.	2010 г. (прогноз)	2020 г. (прогноз)
Нефть	38,3	38,2	37,0	35,7
Газ	29,1	29,2	29,6	28,7
Уголь	22,1	22,4	24,0	26,4
Другие виды	10,5	10,2	9,4	9,2
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0

Завершившийся XX век отличался высочайшими темпами роста энергопотребления (табл.2). Однако обеспеченность мирового сообщества запасами нефти на 01.01.2000 г. составляла всего лишь 43 года. Поэтому уже сегодня целесообразны поиск и разработка принципиально новых стратегий освоения углеводородного сырья.

К настоящему времени А.Е.Воробьевым разработана научная концепция техногенного воспроизводства твердых рудных минеральных ресурсов (как на поверхности, так и в глубинах литосферы). Дальнейшее ее развитие предполагает изучение возможности, механизма и процессов контролируемого воспроизводства не только рудного сырья, но и нефти, которые отличаются от искусственного рудообразования (происходящего главным образом за счет перераспределения в массиве горных пород химических элементов – металлов) необходимостью первичного синтеза полезного компонента, а лишь затем – его миграции и концентрации.

В качестве основного источника для синтеза искусственной нефти предполагается использование отходов жизнедеятельности человеческой цивилизации, т.е. их полезная утилизация.

Авторами были исследованы и систематизированы основные факторы, определяющие синтез нефтеподобных соединений из органических веществ (ОВ) в специально сформированных для этого в литосфере реакторах (табл.3).

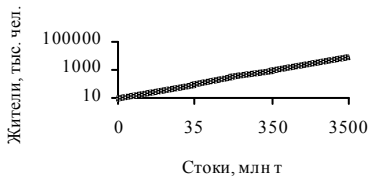
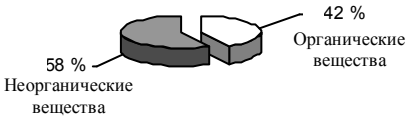
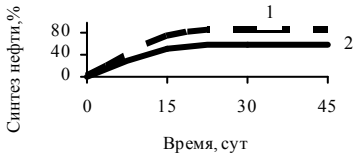
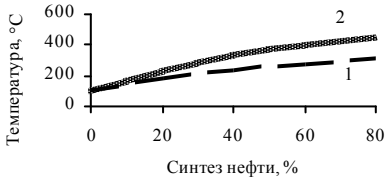
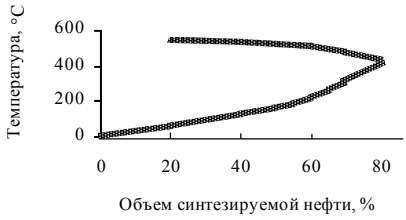
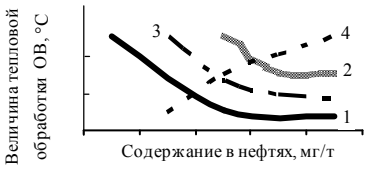
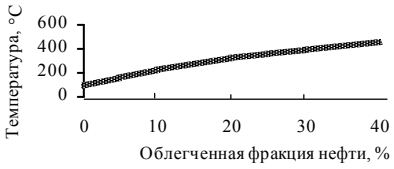
Нефтегенерационный потенциал в значительной мере контролируется первоначальным составом ОВ, который в свою очередь определяется природой исходного живого вещества и особенностями его последующих превращений. Например, было установлено, что ОВ, обогащенное водородом, требует гораздо больших температур для своего преобразования.

Термодеструкционное разложение ОВ сапропелевой и гумусовой природы также принципиально различается по своей сущности. В сапропелевом ОВ (главным образом аморфной структуры) происходит быстрое термохимическое разложение всего объема в целом и его фрагменты (асфальтены и смолы) захватываются в подвижную битумоидную фракцию, а в гумусовом и лейптинито-гумусовом ОВ (представляющем структурированные биополимеры) отщепляются лишь отдельные периферийные фрагменты алкановой природы с последующей дегидратацией и уплотнением остаточного ОВ. В битумоид поступает незначительное количество смол и асфальтенов (главным образом, за счет сапропелевой примеси и отдельных лейптинитовых микрокомпонентов типа резинита).

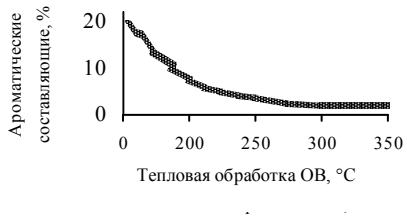
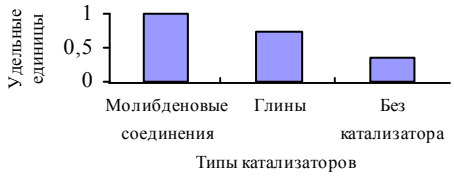
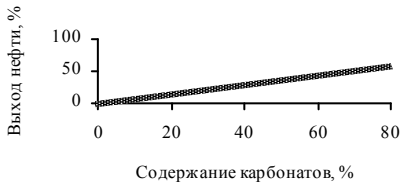
В последние годы появилось значительное число экспериментальных работ, которые подтверждают высокий (в целом сопоставимый с сапропелевым ОВ) битумогенерационный потенциал гумусового ОВ. Для последнего подтверждена тесная зависимость выхода нефти от мацерального состава и прямая – от содержания лейптинитовых микрокомпонентов, в том числе резинита, при термолизе которого выделяются легкие жидкие УВ (до C_{15}).

Таблица 3

Основные факторы, определяющие процессы синтеза нефтеподобных соединений в специально созданных в литосфере реакторах

Генетическая область факторов	Основные факторы	Аналитические и экспериментальные зависимости
Техногенная составляющая	Динамика изменения величины городских стоков	
	Соотношение загрязнений в городских стоках	
Вид органического вещества	Нефтеобразующий потенциал различных ОВ	 1 – гумусовое ОВ; 2 – сапропелевое ОВ
	Различия в выходе нефтеподобных соединений в зависимости от температуры воздействия	 1 – гумусовое ОВ; 2 – сапропелевое ОВ
Литосферная составляющая	Динамика выхода синтезируемой нефти	
	Изменение содержания различных компонентов нефтей	 1 – сера; 2 – асфальтены; 3 – смола; 4 – парафины
	Выход легких фракций нефти в зависимости от температуры	

Окончание табл.3

Генетическая область факторов	Основные факторы	Аналитические и экспериментальные зависимости
Литосферная составляющая	Динамика изменения ароматических составляющих нефтей	
	Влияние катализаторов на скорость нефтеобразования	
	Влияние на выход нефти карбонатсодержащих пород	

По уменьшению битумогенерационной способности гумусовые мацералы выстраиваются в следующий ряд: воски + пыльцевые компоненты → резинит → споринит + кутинит + суберинит → витринит → фюзинит.

Термобарное воздействие на ОВ ведет к увеличению доли битумоидов, а также алифатизации и уменьшению роли циклан и аренов (особенно конденсированных) и монотонному приближению искусственных битумоидов по углеводородному составу к нефти. Последнее особенно четко выражается в постепенном выравнивании концентрации н-алканов с нечетным и четным числом атомов углерода в цепи, а также в новообразовании УВ бензиновых и керосиновых фракций.

К конечной стадии термобарного воздействия в синтезируемых битуминозных компонентах преобладают насыщенные УВ, в которых среди н-алканов доминируют соединения с нечетным числом атомов углерода в цепи, изоалканов мало, а среди цикланов преобладают конденсированные структуры.

Одним из значительных техногенных источников углеродсодержащих соединений, поступающих в окружающую среду (к тому же предполагающих обязательную утилизацию и обезвреживание), являются городские и промышленные стоки. Так, стоки в Москве состоят из 66 $м^3$/с сточных вод городской канализации, сбрасываемых в р. Москву, и 5 $м^3$/с сточных вод промышленных предприятий, поступающих в реку помимо общегородских сетей канализации.

Поверхностный сток с городских территорий, как правило, формируется за счет талых снеговых и дождевых вод, а также поливомоечных вод. По районам Москвы величина модуля поверхностного стока изменяется в пределах от 5,64 (Железнодорожный район) до 15 л/с·$км^2$ (Свердловский район). Наблюдается увеличение модуля стока от окраин города к центру. Средний для Москвы модуль поверхностного стока составляет 9 л/с·$км^2$. Поверхностный сток с территории города не очищается от загрязнений и прямо попадает в природные водные объекты, неся с собой большое количе-

ство органических и взвешенных веществ, а также нефтепродуктов.

В целом по Москве в течение года с поверхностным стоком поступает 3840 т нефтепродуктов, 452080 т взвешенных веществ, 173280 т хлоридов и 18460 т органических веществ (по БПК).

В среднем миллионный город ежегодно в канализационную сеть и помимо нее сбрасывает до 350 млн т загрязненных сточных вод (включая ливневые и талые воды с промышленных площадок, городских свалок и стоянок автотранспорта). В этих стоках содержится около 36 тыс.т взвешенных веществ (в том числе фосфатов – 24 тыс.т, азота – 5 тыс.т, нефтепродуктов – до 5 тыс.т.). В частности, только общее количество осадка сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений России составляет свыше 10 млн т в год по сухому веществу. Из-за относительного однообразия хозяйственной деятельности человека состав бытовых сточных вод довольно-таки однотипен и устойчив (г/сутки):

$БПК_{полн}$ неосветленной жидкости	73
Взвешенные вещества	65
$БПК_{полн}$ осветленной жидкости	40
Хлориды	9
Аммонистые соли	8
Фосфаты (в расчете на P_2O_5)	3,3
в том числе от моющих веществ	1,6
Поверхностно-активные вещества	2,5

Органические вещества в городских стоках находятся в виде белков, углеводов, жиров и других продуктов физиологической переработки.

Сравнительно с извержениями травоядных отбросы человеческого организма богаче (в пересчете на сухое вещество) азотом и фосфорной кислотой. Во-первых, это обусловлено тем, что пища человека значительно богаче белками, чем корм травоядных. Если, например, в пище животных (сене) содержится 1,5 % азота, то в пище человека его бывает от 2-3 % (зерна хлебов) до 15 % (мясо).

Во-вторых, пища людей лучше переваривается, а это значит, что большая ее часть окисляется, превращается в воду и углекислый газ, следовательно, оставшаяся доля больше обогащается исходными элементами, чем в организме травоядных. В отходах жизнедеятельности людей содержится (соответственно в твердом и жидком соотояниях): азота 2 и 14 г, золы 4,5 и 14 г, фосфорной кислоты 1,35 и 1,78 г, оксида калия 0,64 и 2,29 г.

Превращение органического вещества в специально сформированных в литосфере реакторах в нефтеподобное соединение является сложным технологическим процессом, требующим насыщения исходного вещества водородом до 8-12 % (в зависимости от качества нефти).

Наиболее универсальным методом получения нефтеподобных продуктов из ОВ является гидрогенизация, т.е. воздействие молекулярным водородом под давлением при повышенной температуре с использованием определенных катализаторов.

При гидрогенизации происходят деструкция органических веществ и насыщение (гидрирование) их водородом с получением смеси жидких продуктов, фракционный и химический состав которых аналогичен природной нефти (за исключением повышенного содержания ароматических углеводородов и гетероатомных соединений). Для того, чтобы из органического вещества образовались нефть и нефтеподобные соединения, необходимо подвести дополнительную энергию.

В литосфере имеются все возможности для обеспечения процесса битумообразования – это повышенные температура и давление, которые обычно связаны между собой и с недрами:

Глубина, м	1000	2000	3000	4000
Температура, °С	45	75	105	135
Глубина, м	5000	6000	7000	8000
Температура, °С	165	195	225	255

В специально сформированном в литосфере реакторе синтеза нефтеподобных соединений даже при относительно низких температурах (300-450 К) возбуждение ОВ может осуществляться переходом молекул

на близлежащие уровни энергии (вращательные, колебательные, уровни от внутренних вращений и межмолекулярных взаимодействий), в результате чего происходит частичное разрушение надмолекулярного строения ОВ, конформационные превращения, десорбция влаги и т.д.

Дальнейшее повышение температуры вызывает заселение вышележащих колебательных, а также электронных уровней ОВ, что приводит к многочисленным разрывам химических связей и интенсивному осуществлению термохимических реакций (структурные превращения, диспропорционирование водорода и т.д.). При этом молекулярный водород ОВ, активированный радикалами и катализаторами, вступает в следующие реакции: стабилизации радикалов – продуктов деструкции; гидрирования ароматических колец; удаления гетероатомов; восстановления доноров водорода.

При генерации радикалов, бомбардирующих ОВ, происходит дополнительный разрыв связей в молекулах ОВ, отщепление и отъединение жидких и газообразных УВ, а молекулярная структура получает более упорядоченную структуру.

Следовательно, с накоплением ароматических структур резко увеличивается энергия межмолекулярных взаимодействий (соответственно и температура начала размягчения ОВ).

В ходе техногенного нефтеобразования общая направленность процесса энергетического воздействия на ОВ заключается в разделении углерода и водорода: в создании горючих веществ, максимально обогащенных водородом, с одной стороны, и веществ, максимально обогащенных углеродом, с другой.

Состав получаемых жидких продуктов гидрогенизации ОВ аналогичен тяжелым видам нефти. Однако имеются и их отличительные особенности – повышенное содержание кислородных соединений (в частности, фенолов), а также наличие в составе нефтеподобных продуктов нестабильных непредельных углеводородов и сернистых соединений.

На низких ступенях термобарного преобразования для рассеянного ОВ характерен бесструктурный тип. Для сапропелевого и гумусово-сапропелевого вещества в этих термодинамических параметрах типичны пониженная ароматичность, значительное содержание кислорода в различных химических формах, обедненность метильными группами и длинными парафиновыми цепями.

По мере углубления термобарного преобразования, за счет исходных жирных кислот, восков и других соединений, богатых водородом, образуются тяжелые жидкие углеводороды. При этом увеличивается степень ассоциированности вещества и снижается количество гетероэлементов (N, O, S), а также возрастает насыщенность циклических структур.

Для процесса целенаправленного преобразования геополимеров особенно важны средние уровни P-T-воздействия. В этих параметрах происходит максимальная потеря нереактивного кислорода (связанного не с функциональными группами, а с внутренней структурой преобразуемого органического вещества).

Потеря нереактивного кислорода свидетельствует о том, что кроме продолжающегося (при углублении термобарного воздействия) отщепления функциональных групп, обеспечивается разрыв внутренних кислородных связей между конденсированными группами в макромолекулах, а также поликонденсация отдельных структурных единиц преобразуемого органического вещества. При этом формируются вторичные макромолекулы, потерявшие при предшествующем разукрупнении часть углеводородов, но вновь обогащенные кислородсодержащими функциональными группами благодаря разрыву внутренних связей.

Таким образом, процесс термобарного преобразования весьма сложного органического вещества выражается в потере функциональных групп, а также уменьшении количества боковых углеводородных цепей и конденсации ароматических ядер с разрушением мостиковых связей.

Установлено, что чем выше уровень теплового воздействия, тем легче синтезируемая нефть и ее вязкость уменьшается при уменьшении среднего содержания серы, смол и асфальтенов.

Техногенный процесс синтеза нефти в специально подготовленных литосферных реакторах (как и природные процессы нефтеобразования) количественно определяется по параметру T^0_{max}. В частности, значениям 435-465 °С отвечает максимум нефтеобразования.

Еще одним главным фактором преобразования ОВ в специально сформированных в литосфере реакторах является воздействие повышенного давления. Давление обычно линейно изменяется с глубиной, приблизительно на гидравлический градиент, составляющий от 9,7 до 12,4 ат на каждые 100 м глубины горного массива. В результате этого в интервале глубин 1,3-3,5 км при $P_{лит} \sim 1$ кб и $T = 80$-200 °С процесс нефтегенерации протекает наиболее интенсивно.

По мере повышения геотемператур и давления происходит генерация все более легких продуктов термодеструкции ОВ.

Весьма важным фактором, обеспечивающим превращение органики в синтетическую нефть, является воздействие микроорганизмов.

Бактериальная флора на первоначальном этапе преобразования ОВ во многом определяет режимы соответствующих зон, существенно влияя на возникновение окислительных и восстановительных геохимических обстановок. В частности, в окислительной среде отмирающее белковое вещество под воздействием бактерий генерирует CO_2, N_2, NO_2, тогда как в восстановительной обстановке образуются CO, NH_3, H_2S, H_2 и CH_4, а также тяжелые предельные и непредельные газообразные углеводороды. Анаэробное бактериальное окисление ОВ имеет большую интенсивность для сапропелевого вещества по сравнению с гумусовым, обогащенным детритовым материалом.

При низкотемпературном воздействии на ОВ определяющими являются следующие химические процессы превращения биомолекул: гидролиз, гидратация, диспропорционирование водорода, полимеризация и поликонденсация. В этот период в фоссилизируемом ОВ происходит формирование не только газообразных, но и высокомолекулярных УВ (главным образом за счет переработки ОВ бактериями). Процессы декарбоксилирования жирных кислот ведут к новообразованию н-алканов, а диспропорционирование водорода непредельных соединений – к новообразованию нафтеновых структур, которые преобладают среди изоциклоалифатических УВ.

Для развития последующих технологий техногенного воспроизводства нефти весьма важно и то, что воздействие микроорганизмов на стераны протекает селективно: в первую очередь окисляются стераны, имеющие 20R конфигурацию, т.е. биостераны.

Благодаря воздействию микроорганизмов зачастую происходит как разрушение, так и новообразование структур, отсутствующих в исходных нефтях. К числу таких углеводородов можно отнести: 25-норгопаны, Т-образные изопреноиды, изопреноиды типа «голова к голове» и прочие.

Алканы могут быть преобразованы монотерминально до формы спирта, причем первая ступень осуществляется благодаря ферменту оксигеназе, в результате чего кислород непосредственно включается в структуру молекулы до формы спирта, либо до формы кетона.

Кроме того, алканы атакуются микроорганизмами детерминально. Например, Pseudomonas aeruginosa может воздействовать на 2-метилкапроновую кислоту с обоих концов углеродной цепи, образуя смесь 5-метилкапроновой и 2-метилкапроновой кислот. Алканы могут быть также десатурированы терминально или субтерминально с образованием алкенов.

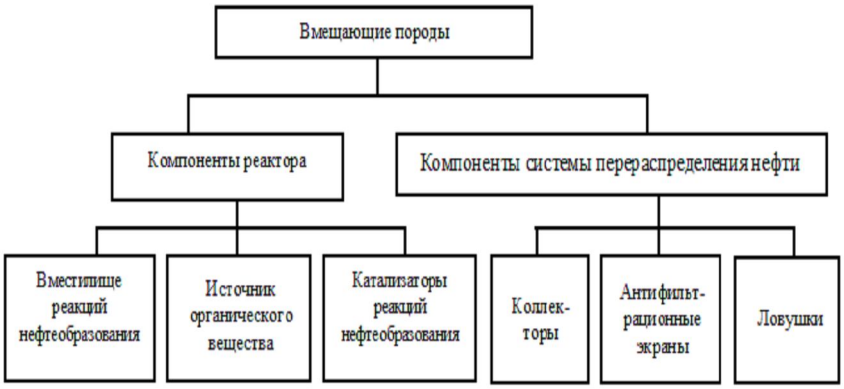


Рис.1. Роль вмещающих пород в процессе нефтеобразования

Микробному воздействию подвергаются также длина цепи алифатических углеводородов и ее боковые цепи. Например, некоторые бактерии, которые воздействуют на алканы с длиной цепи $C_8 – C_{20}$, не способны к атаке на алканы с длиной цепи $C_1 – C_6$, тогда как другие не могут расти на алканах с длиной цепи более C_{10}. Известно, что грибы могут расти на алканах с длиной цепи до C_{34}. Кроме этого, метальные и пропильные группы в определенных положениях алканового углерода уменьшают или предотвращают утилизацию веществ микроорганизмами.

Алкены далее могут быть превращены в эпоксиды, которые затем включаются в метаболизм с образованием диолов.

В процессах техногенного нефтеобразования чрезвычайно важна роль вмещающих пород, которые могут являться как компонентами природного химического реактора, так и служить коллектором или антифильтрационным экраном (рис.1).

Одной из наиболее удачных геохимических характеристик вмещающего горного массива, как реактора нефтеобразования, служит отношение концентраций изопреноидов $C_{19} : C_{20}$ – пристана к фитану. По величине этого отношения выделяются три основных типа обстановок преобразования ОВ в нефть – резко восстановительная ($Ф \leq 0,6$), восстановительная ($Ф = 0,6$-5) и слабоокислительная ($Ф = 5$-15).

Таким образом, содержание подвижной части синтезируемых углеводородов (битумоидов) зависит не только от типа исходного ОВ (гумусовый, сапропелевый и др.) и параметров Р-Т-обработки, но и от состава минеральной составляющей горных пород реактора. В частности, чем меньше в них нерастворимого в соляной кислоте остатка (кварцево-кремниевого, полевошпатового и глинистого материала), тем выше содержание синтезируемых битумоидов.

Повышенная карбонатность способствует возрастанию доли синтезируемых битумоидов в ОВ. Более того, карбонатность повышает также и степень восстановленности синтезируемых битумов, т.е. содержание в них масляной углеводородной части.

Для ускорения процессов термодеструкции ОВ и синтеза из них техногенной нефти в качестве катализаторов могут быть применены (табл.4):

- d-переходные металлы и их ионные формы;
- оксиды, не имеющие в своем составе переходных элементов, но обладающие полупроводниковыми свойствами, управляемыми свободными электронами и дырками или одновременно теми и другими (концентрацию их изменяют путем внедрения в оксидную фазу легирующих примесей);
- вода;
- металлорганические комплексы, играющие в технологических процессах роль промежуточных соединений.

Таблица 4

Классы гетерогенных катализаторов

Класс катализатора	Примеры катализаторов	Тип катализируемой реакции	Примеры реакций
d-переходные металлы	Fe, Ni, Pd, Pt	Гидрирование, дегидрирование, окисление	Каталитическое преобразование системы
Полупроводниковые оксиды	V_2O_5, NiO, CuO	Окисление и восстановление	Контактный процесс
Изоляторы (диэлектрики)	Al_2O_3, SiO_2	Гидрирование, дегидрирование	Получение этилена путем дегидрирования этанола
Кислотные катализаторы	Природные глины (алюмосиликаты), H_2SO_4	Изомеризация, полимеризация, крекинг	Крекинг углеводородов с длинной углеродной цепью

Кроме каталитических характеристик, в процессе техногенного воспроизводства нефти в глубинах литосферы весьма важны коллекторские свойства вмещающего горного массива.

На величину проницаемости прежде всего влияют структура и текстура горной породы, морфология и структура пустотного пространства, вещественный (минеральный) состав и количество цемента, лиофильность или лиофобность (как горной породы в целом, так и цементирующего вещества).

Вследствие уменьшения свободного сечения пор (при увеличении водонасыщения пород) исходная проницаемость горного массива заметно снижается, а с увеличением медианного размера обломочного материала (за счет увеличения сечения каналов) проницаемость возрастает. Кроме этого, проницаемость характеризуется анизотропией, наиболее резко выраженной у терригенного коллектора и менее у карбонатного.

Емкостные свойства карбонатных пород определяются сложным сочетанием полостей различных типов (пор, каверн и трещин), отличающихся в основном геометрией и размерами.

Горные породы (слагаемые из них горные массивы) обладают и антифильтрационными свойствами.

Количественное определение величины проницаемости основано на законе линейной фильтрации Дарси:

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q\mu L}{\Delta P S},$$

где Q – расход флюида в единицу времени; μ – вязкость флюида; L – длина пористой среды; ΔP – перепад давления; S – площадь фильтрации.

Например, эффективной покрышкой техногенных углеводородных залежей могут являться соли и ангидриты. Причем проницаемость последних ($2 \cdot 10^{-8}$ Мдарси) на два порядка ниже, чем у аргиллитов. Также установлено, что соли при повышении давлений и температур резко снижают исходную проницаемость, а в диапазоне давлений 280-350 кг/см^2 и температур 28-32 °С (характерных для глубин 1200-1500 м) фильтрация газа через них практически полностью прекращается.

Тщательный учет рассматриваемых факторов возможного превращения ОВ позволил разработать базовую модель литосферного реактора синтеза нефти из углеродсодержащих стоков (рис.2).

Формирование техногенных скоплений нефти определяется совокупностью происходящих процессов синтеза нефти в специально сформированных в литосфере реакторах, ее массового перемещения и аккумуляции в целенаправленно созданных ловушках.

По мере повышения температуры и давления одновременно реализуются два процесса:

- подключаются новые резервы углеродсодержащих стоков (новые массы ОВ), способные к дальнейшему преобразованию;
- среди той части ОВ, которая уже перешла энергетический предел, нарастает до-

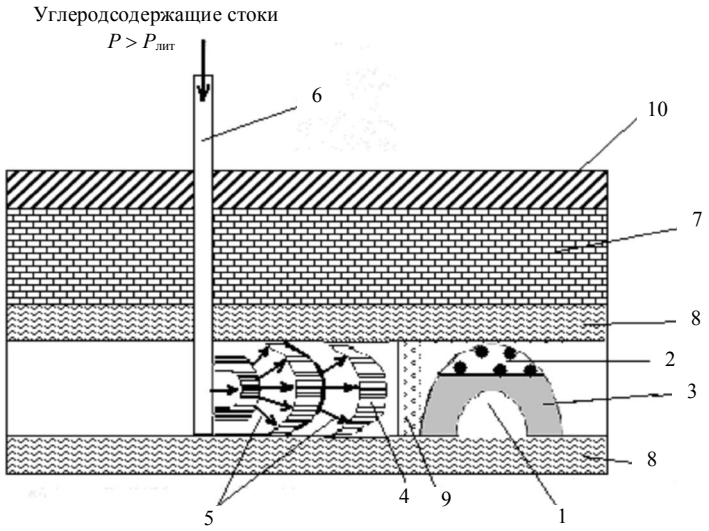


Рис.2. Базовая модель литосферного реактора синтеза нефти

1 – ловушка УВ; 2 – газовая шапка; 3 – синтезированная нефть; 4 – фронт распространения синтезируемой нефти; 5 – движение флюидов; 6 – перфорированный трубопровод; 7 – вмещающие реактор горные породы; 8 – глины; 9 – наведенная трещиноватость; 10 – породы

ля молекулярных групп, реализовавших свой потенциал и отъединившихся от биополимера.

Количество нефтеобразующего вещества в искусственном реакторе, расположенном в литосфере, в единицу времени прямо пропорционально скорости подачи углеродсодержащих стоков (a) и обратно пропорционально скорости процесса (v) их переработки. Выделив в процессе формирования техногенных нефтяных месторождений интервалы времени Δt с ускоренным развитием ($a > 0$) для каждого из них (с учетом мощности реактора, равной Δtv) количество углеродсодержащего вещества, необходимого для нефтеобразования продукта, определим из уравнения

$$\frac{x_i \Delta t_i a_i}{v_i} = x\ \Delta t_i a_i .$$

Скорость процессов нефтеобразования при подаче в литосферный реактор углеродсодержащих стоков определяется по формуле

$$\frac{dv}{dt} = f(V, C_{орг}, K_1, K_{стр}, T, P_{гс}, P_{фл}),$$

где V – объем углеродсодержащих стоков; $C_{орг}$ – содержание углерода в стоках; K_1 – тип ОВ; T – температура; $K_{стр}$ – структура горных пород (степень открытости пустотных пространств); $P_{гс}$ – давление геостатическое; $P_{фл}$ – давление флюидов.

Таким образом, для эффективного нефтеобразования необходимо наличие техногенных стоков с содержанием $C_{орг}$ не менее 1-0,5 %.

Температура на глубине h

$$T_h = T_o + \Gamma h,$$

где T_o – температура годовых амплитуд, ºС; Г – геотермический градиент, ºС/м.

Давление вышезалегающих пород рассчитывается по формуле

$$P_{гс} = \rho g h ,$$

где ρ, h – соответственно средняя плотность и мощность вышезалегающих пород; g – ускорение свободного падения.

Необходимо учитывать, что с ростом суммарной миграции углеводородов из зоны реактора давление монотонно падает.

Интенсивность нефтеобразования зависит от степени дисперсности органического вещества, проницаемости пласта, количества щелочных ионов (оказывающих промотирующее влияние при катализе на алюмосиликатах) и степени гидрогенизации органического вещества глубинным водородом.

В итоге удельные количества генерированных в специально созданный в литосфере реактор нефти и углеводородного газа можно вычислить по следующей формуле:

$$V_{\text{ген}} = C_{\text{орг}} h_{\text{р}} K_1,\ K_2 K_3,\ T,\ K_{\text{р}} P_{\text{гс}},\ P_{\text{фл}},$$

где $C_{\text{орг}}$ – концентрация ОВ; $h_{\text{р}}$ - мощность зоны реактора; K_2 – коэффициент, характеризующий (в долях единицы) морфологию ОВ; K_3 – коэффициент теплопроводности пород реактора; $K_{\text{р}}$ – барический коэффициент.

Время вытеснения синтезируемой нефти из специально подготовленного в литосфере реактора

$$t = \frac{SK_{\text{п}}q}{PT},$$

где $K_{\text{п}}$ – пористость горного массива; S – площадь вытеснения; q – вязкость нефти; t – время полного прохождения порового объема углеводородов из реактора.

Таким образом, процессы техногенного нефтеобразования, являющиеся весьма сложными, зависят от множества факторов: количества, состава и формы распределения ОВ, структуры содержащих его горных пород, температур и давлений, строения горных массивов, степени их гидравлической изолированности и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воробьев А.Е.* Техногенное воспроизводство углеводородного сырья в литосфере: факторы, механизмы и перспективы / А.Е.Воробьев, Г.А.Балыхин, А.Д.Гладуш. М.: Изд-во «Учеба» МИСиС, 2003. 417 с.

2. *Воробьев А.Е.* Техногенное воспроизводство нефти и горючего газа в литосфере: концепция, принципы и механизмы / А.Е.Воробьев, Г.А.Балыхин, А.Д.Гладуш. М.: Изд-во «Учеба» МИСиС, 2005. 334 с.

3. *Воробьев А.Е.* Основы техногенного воспроизводства нефти, горючего газа и угля в литосфере / А.Е.Воробьев, Г.А.Балыхин, А.Д.Гладуш; РУДН. М., 2006. 334 с.