

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 3 / 2026, Vol. 18, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/31NZVN326.pdf>

DOI: 10.15862/31NZVN326 (<https://doi.org/10.15862/31NZVN326>)

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сосулина, А. Е. Применение управляемого роя магнитных наноактюаторов для предотвращения гидратообразования в насосно-компрессорных трубах / А. Е. Сосулина, Т. В. Чекушина, К. А. Воробьев, А. Н. Соловьев // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/31NZVN326.pdf>. DOI: 10.15862/31NZVN326.

For citation:

Sosulina A.E., Chekushina T.V., Vorobyov K.A., Solovyov A.N. Application of a controlled swarm of magnetic nanoactuators for hydrate formation prevention in tubing strings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(3): 31NZVN326. Available at: <https://esj.today/PDF/31NZVN326.pdf>. DOI: 10.15862/31NZVN326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 622.276.5

Сосулина Александра Евгеньевна

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

E-mail: alexa.lina04@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1306667

Чекушина Татьяна Владимировна

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика

Н. В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, доцент кафедры «Недропользования и нефтегазового дела»

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Доктор экономических наук, кандидат технических наук

E-mail: council-ras@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

Воробьев Кирилл Александрович

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика

Н. В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Научный сотрудник отдела горной экологии

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Старший преподаватель кафедры «Недропользования и нефтегазового дела»

Кандидат технических наук

E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

Соловьев Александр Николаевич

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: 11422240075@pfur.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3716-2851>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1291504

Применение управляемого роя магнитных наноактюаторов для предотвращения гидратообразования в насосно-компрессорных трубах

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема борьбы с техногенным гидратообразованием в насосно-компрессорных трубах (НКТ) при эксплуатации глубоких скважин. Описаны технологические и экономические ограничения классических методов химического ингибирования и теплового нагрева. В качестве высокоэффективной альтернативы предложена научно обоснованная концепция активного подавления гидратных отложений за счет использования координированного роя распределенных магнитных наноактюаторов.

Система функционирует под воздействием внешнего переменного магнитного поля, частота которого определяет режимы работы роботов. Вращение роя наноактюаторов генерирует локальные направленные вихревые потоки в пристенной зоне трубопровода, создавая касательные напряжения, значительно превышающие параметры ламинарного течения флюида, что позволяет непрерывно разрушать кристаллические ячейки газогидратов на стадии их зарождения в диффузионном слое без использования химических реагентов.

На основе анализа гидродинамики малых чисел Рейнольдса доказана возможность переключения роя между режимами отталкивания, захвата, инкапсуляции и транспортировки агрегатов к устью скважины. Авторами обоснован перенос результатов моделирования с лабораторных систем на реальные условия многофазного высоковязкого потока в НКТ.

Ключевые слова: наноактюаторы; рой; гидратообразование; насосно-компрессорные трубы; НКТ; магнитные наночастицы; вихревой поток; активное подавление; предотвращение отложений; гидродинамика

Введение

Традиционные способы предотвращения гидратообразования в НКТ сталкиваются с технологическими ограничениями при работе в условиях глубоких скважин.

Использование классических химических реагентов и теплового нагрева требует значительных затрат и обеспечивает лишь пассивное воздействие на поток жидкости по всей длине трубы.

Существующие технологии не учитывают локальные колебания температуры и давления. Стандартные системы не позволяют концентрировать усилия в критических точках, а отсутствие гибкости мешает эффективно реагировать на быстрое изменение условий внутри трубы.

Развитие нанотехнологий позволило создать концепцию активного подавления гидратообразования. Основой данного подхода служат распределенные структуры наноактюаторов, которые функционируют в потоке флюида в формате единой координированной сети.

Мировой рынок услуг по обеспечению бесперебойности транспорта продукции в нефтегазовой отрасли демонстрирует стабильный рост. Согласно экспертным оценкам, в 2025 году его объем составит около 443 млрд долларов США.

К 2035 году прогнозируется увеличение данного показателя до 910 млрд долларов США при сохранении положительной динамики развития сектора (рис. 1).

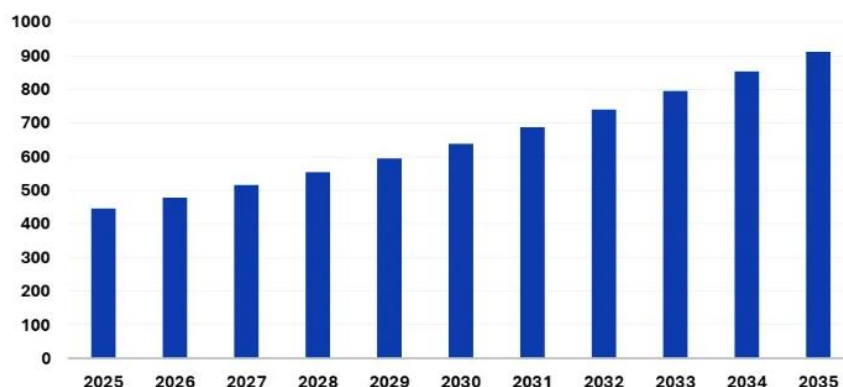


Рисунок 1. Прогноз объема мирового рынка обеспечения бесперебойности транспорта углеводородов на период 2025–2035 гг., млрд долл. США¹

Области применения наноразмерных частиц.

Применение наночастиц в качестве рабочего инструмента для послойной (вплоть до поатомной /поклатратной/) разработки аквальной газогидратной залежи предполагает достижение полного контроля процесса извлечения газа, что обеспечивает необходимую степень технологической безопасности ведения добычных работ [1; 2].

Первоначально предполагалось подавать и использовать наночастицы практически любой формы, а главным фактором являлась их масштабная соразмерность ($2,76 \text{ \AA}$) с разрушаемыми ячейками клатратов — газовых гидратов.

В дальнейшем была установлена явно выраженная зависимость эффективности разрушения газогидратов (рис. 2) от конкретной формы и особенностей наночастиц [3; 4]: в частности, от наличия у сферических наночастиц различных шипов, размещенных равномерно по всей их поверхности.

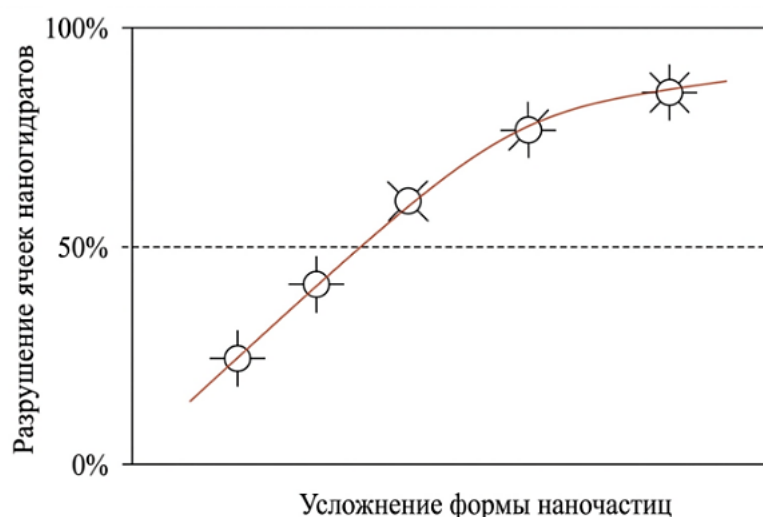


Рисунок 2. Зависимость эффективности разрушения ячеек газогидратов от усложнения формы наночастиц [5]

¹ Flow Assurance in Oil and Gas Market Size 2025 to 2035. — Precedence Research, 2024. — URL: <https://www.precedenceresearch.com/flow-assurance-in-oil-and-gas-market> (дата обращения: 31.05.2026).

Наиболее эффективное расстояние между отдельными (рядом расположенными) шипами наночастицы составляет $1,38 \text{ \AA}$. В этом случае, при перемещении сферической частицы, обладающей шипами, вдоль поверхности ячейки (клатрата) газогидратов происходит периодическое поднятие и опускание острия шипа (рис. 3), что приводит к разрушению каждой кристаллической ячейки, расположенной на пути следования наночастицы, и высвобождению молекул метана из них [5].

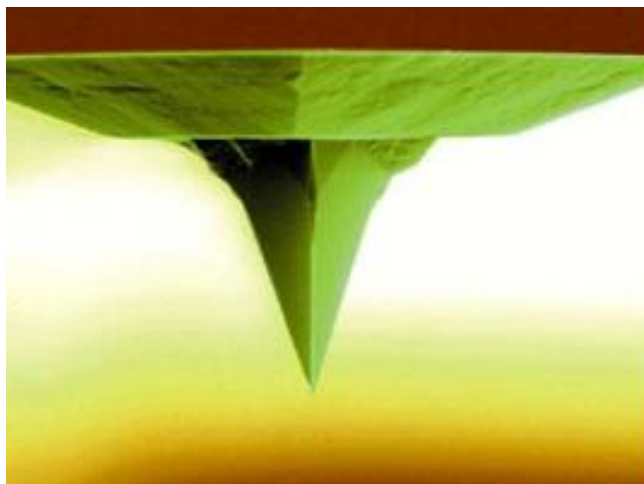


Рисунок 3. Вариант шипа наночастицы [6; 7]

Для эффективного обеспечения процесса разрушения ячейки клатрата, с включенной в нее молекулой метана, также важным представляется выбор оптимальных параметров (длины шипов) и формы (прямолинейной, изогнутой, утолщенной и т. д.) шипов сферической наночастицы. Такие наноструктуры, которые выглядят как природные биологические объекты — морские ежи (рис. 4), довольно легко формируются электрохимическим методом [5].

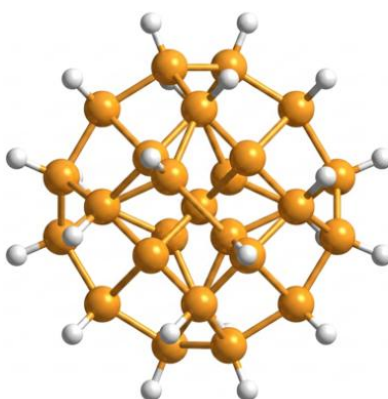


Рисунок 4. Наноеж [5]

В ходе проведенных исследований [5] было установлено несколько довольно существенных аспектов, определяющих эффективность последующего промышленного применения подобных нанотехнологий при разработке аквальных залежей газогидратов.

Во-первых, потенциальная энергия линейного движения, полученная наночастицей, находящейся в составе специально подаваемой гидродинамической струи (рис. 5), обеспечивает ее перемещение по поверхности газогидратов только на весьма короткое расстояние, т. к. зачастую наблюдается ее рикошет (с потерей потенциальной энергии разрушения клатратных связей и резким изменением траектории перемещения) от поверхности газогидратной залежи и, следовательно, практически каждая из них осуществляет разрушение лишь довольно небольшого количества ячеек-клатратов.

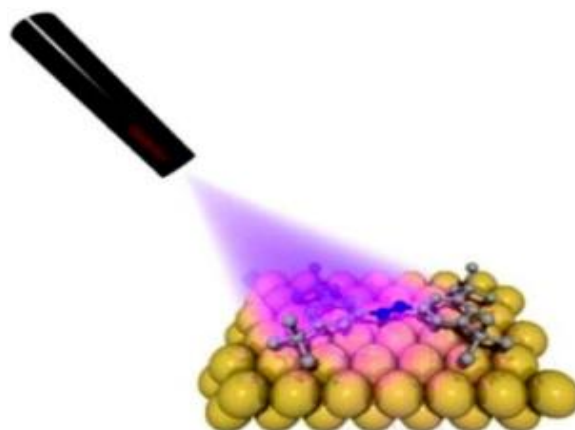


Рисунок 5. *Обработка поверхности газогидратной залежи гидродинамической струей [5]*

Во-вторых, гидродинамический поток, в составе которого перемещается рабочий инструмент-наночастица, не обладает необходимой функцией управления, способной строго выдерживать заданную траекторию перемещения наночастиц по поверхности залежи газогидратов [6].

Функциональное разнообразие наноразмерных актюаторов

Актюатор (*англ.* Actuator) — исполнительное устройство или его активный элемент, преобразующий один из видов энергии (электрической, магнитной, тепловой, химической и др.) в другую, чаще всего в механическую, что приводит к выполнению определенного действия, заданного управляющим сигналом.²

В технике устройства такого типа включают: электрические двигатели, электрические, пневматические или гидравлические приводы, релейные устройства, электростатические двигатели, DMD-зеркала и электроактивные полимеры, хватающие механизмы роботов, приводы их движущихся частей, включая соленоидные приводы и приводы типа «звуковая катушка», а также многие другие [7; 8].

При этом существует несколько принципиально различных подходов к обеспечению эффективного функционирования нанороботов: одним из них является создание и использование самоходных наноразмерных актюаторов (наномоторов). Как правило, такой наномотор представляет собой специальное устройство, способное преобразовывать подаваемую или ранее зааккумулированную энергию в целенаправленное движение. В типичном случае он может создавать силу порядка одного пиконьютона.

В настоящее время ведущие научно-исследовательские институты различных стран мира проводят теоретическое обоснование и многочисленные экспериментальные исследования по созданию нанодвигателей нескольких типов, многообразие которых объясняется использованием различных принципов их функционирования, разработкой принципиально новых конструкций и оптимизацией параметров и характеристик.

По сравнению с традиционно используемым в технологиях обычной размерности электромагнитным методом, в нанотехнологиях существует возможность применения и некоторых других эффектов и явлений, которые ранее не представлялось возможным использовать по функциональным (табл. 1) или ценовым характеристикам.

² Воробьев А. Е., Гладуш А. Д. Наноинженерия топливно-энергетического комплекса: учебное пособие в 3 т. (том 3) — Москва: РУДН, 2019. 417 с. ISBN: 5209096807.

Таблица 1

Типичные значения различных энергетических показателей и коэффициентов полезного действия в зависимости от вида методов преобразования энергии в актюаторах

Метод активации	Плотность энергии, Вт с/м ³	Показатель степени для $F \sim R_n$	Время отклика, τ [30 с]	КПД, %
Электростатический	10^4	2	$< \tau_{\text{мех}}^*$	0,5
Электромагнитный	10^5	от 2 до 4	$< \tau_{\text{мех}}$	$< 0,01$
Пьезоэлектрический	$2 \cdot 10^5$	2	$< \tau_{\text{мех}}$	0,3
Магнито-калориметрический	$2 \cdot 10^4$	-	$< \tau_{\text{мех}}$	$< 0,05$
Памяти формы	$3,5 \cdot 10^5$	2	< 50	0,01
Термопневматический	$< 5 \cdot 10^5$	2	10	0,1
Биметаллический	10^6	2	< 50	10 ⁻
Молекулярный	$2 \cdot 10^7$	-	$< \tau_{\text{мех}}$	0,5
Биологическое преобразование энергии	$6 \cdot 10^7$	-	< 50	0,6

* $\tau_{\text{мех}}$ — время механического отклика системы, зависящее от вязкоупругих свойств материала (около 1 мкс) [5]

К настоящему времени известно несколько различных способов преобразования потенциальной химической, тепловой, световой и электрической энергии в кинетическую энергию движения [5]. В соответствии с этим разнообразием были выделены следующие виды наноактюаторов: биологические нанодвигатели, биомеханические актюаторы, механические наноактюаторы, ультразвуковые наноактюаторы, наномоторы с эффектом поверхностного натяжения, ротор нанодвигателя на основе нанотрубки, химические наноактюаторы, световые наноактюаторы, магнитные наноактюаторы, тепловые наноактюаторы, пьезомагнитные наноактюаторы, электромагнитные наноактюаторы, вибрационные наномоторы, квантовый нанодвигатель [5].

Выбор используемого принципа активации нанороботов следует осуществлять, прежде всего, с учетом их последующей максимальной эффективности обеспечения необходимых работ.³

В качестве специфической разновидности химических наноактюаторов можно рассматривать так называемые биологические молекулярные моторы.

В живых организмах функционирует несколько видов подобных наноактюаторов:



Рисунок 6. Бактериальный жгутик с роторным мотором [5]

³ Нанотехнологии: азбука для всех // Под ред. Ю. Д. Третьякова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 368 с.

Во-первых, это бактерии,двигающиеся с помощью жгутиков-нитей, вращаемых ротационным наномотором размером с вирус (рис. 6).

Данный наномотор может вращаться со скоростью примерно до 1000 оборотов в 1 секунду, а некоторые виды бактерий плавают со скоростью больше 10 мкм/с. Такие биомоторы бактерий довольно экономичны [5].

Во-вторых, АТФаза, представляющая собой довольно распространенный природный фермент, служащий в живой клетке для расщепления белков, жиров и углеводов. АТФаза состоит из 2-х отдельных частей: гидрофобной и гидрофильной, ответственных за синтез и гидролиз АТФ. В процессе синтеза/гидролиза АТФ происходит вращение ее центральной субъединицы.

Мотор F_1 -АТРсинтаза выглядит как немного приплюснутый шарик и вращается как настоящий мотор, чтобы производить АТФ — химический элемент, являющийся энергетической основой для жизни. При своих малых размерах данный мотор производит довольно значительное количество вращающегося момента [5].

Комбинированный биомеханический нанодвигатель представляет собой специально сконструированную систему, состоящую из одного или нескольких бионанодвигателей (например, из АТФазы), закрепленных на особых конструкциях и преобразующих химическую энергию топлива (АТФ) в кинетическую энергию вращения или линейного движения.

Современные биомеханические нанодвигатели имеют наиболее эффективное сочетание удельной мощности и схемы управления, но физическое их размещение непосредственно в наномашину весьма сложно, т. к. большинство движущихся элементов имеют довольно нестабильную связь с приводом.

Был создан ряд биомеханических нанодвигателей, использующих в своей работе некоторые элементы живых клеток или их аналоги, которые в процессе своей жизнедеятельности совершают вращательное или поступательное движение, осуществляемое на основе явления комплементарности ДНК.

Например, двуногий шагающий биомеханический наноробот (рис. 7) перемещается за счет поочередного присоединения и отсоединения своих «ног» (длиной около 10 нм) от «липких концов» основания, состоящего тоже из ДНК.

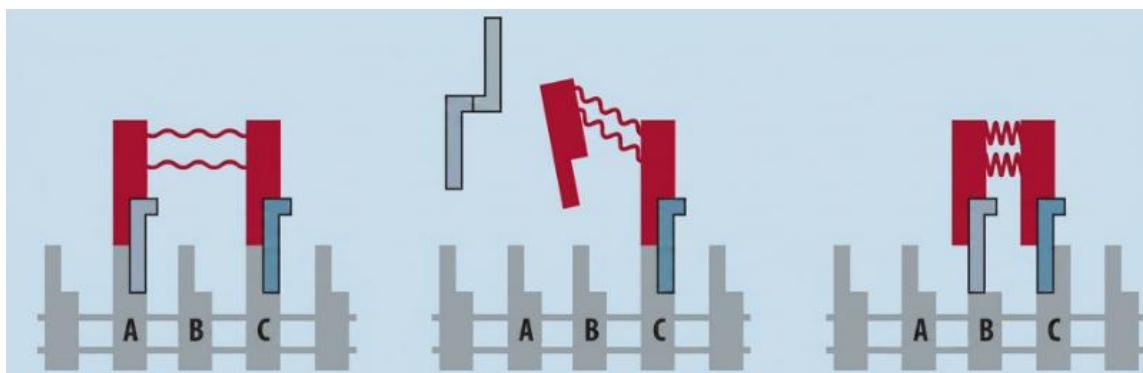


Рисунок 7. «Шагающий» наноробот на основе ДНК [5]

По прямой аналогии с таким биоактюатором, как мышцы живых организмов, может быть разработано еще одно наноустройство, механизм перемещения которого объясняется следующим. В основе работы механического наноактюатора находится явление кулоновского отталкивания нанотрубок, возникающее при подаче на полосу азрогеля напряжения электрического тока относительно заземленного электрода, благодаря чему происходит расширение полосы (рис. 8).

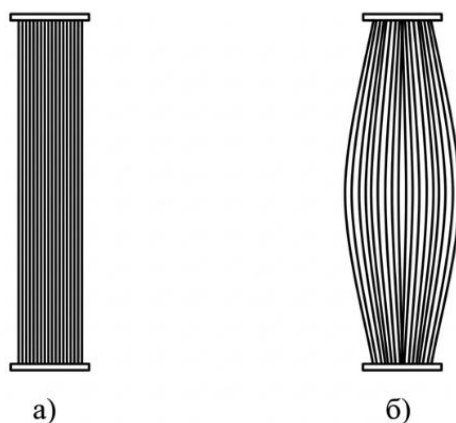


Рисунок 8. Принцип электростатической работы по расширению полосы аэрогеля [5]: (а) до подачи напряжения; (б) после подачи напряжения

Полоса аэрогеля также на несколько процентов уменьшается в продольном направлении, что приводит к возникновению значительного механического напряжения, в 30 раз большего, чем у мышц животных [5].

Ученые из Национального института стандартов и технологий США (NIST) обнаружили, что золотые наночастицы, имеющие строго определенную форму, при их погружении в воду под воздействием высокочастотных ультразвуковых волн, могут вращаться на огромной скорости. Использовались золотые нанопрутки, длина которых составляла 2 микрона, а диаметр — не более 300 нанометров. В ходе исследований было установлено, что такой нанодвигатель может вращаться со скоростью 150 тыс. оборотов за 1 минуту [5].

Поверхностное натяжение играет значительную роль в различных устройствах наноразмерного диапазона и уже с микронных масштабов играет доминирующую (по сравнению с другими силами физической природы) роль. Даже весьма слабое электромагнитное поле способно существенно изменять поверхностное натяжение капель жидкости, поэтому его необходимо рассматривать в качестве возможной движущей силы в наноактюаторах.

Физики из США построили первый наноэлектромеханический актюатор, в котором были задействованы эффекты поверхностного натяжения. Состоит данный наноактюатор из 2-х капель жидкого индия, размещенных на поверхности углеродных нанотрубок, и приводится в движение слабым электромагнитным полем (рис. 9).

Электрический ток, протекающий по нанотрубке, вызывает миграцию отдельных атомов капель индия, начиная с самой левой капли, расположенной ближе всего к титановому острию, вдоль нанотрубки от капли I к капле II.

Силы поверхностного натяжения заставляют капли меняться местами, используя созданный касанием гидродинамический канал. Цикл обмена каплями протекает за 200 пикосекунд при напряжении 1,3В [5].

Принцип действия нанодвигателя на основе нанотрубки состоит в следующем: при вращении одной нанотрубки внутри другой сила трения ничтожно мала, а вот величина трения на поверхности нанотрубки в газовом потоке весьма велика. Используя эту разницу в значениях сил трения, можно заставить вращаться внешнюю нанотрубку, воздействуя на нее газом.

Химическое управление наноактюаторами обычно осуществляется как за счет проявления различных обратимых химических реакций, происходящих в активном веществе движителя, так и путем изменения состава окружающей среды: кислотности, электропроводности и некоторых других факторов.

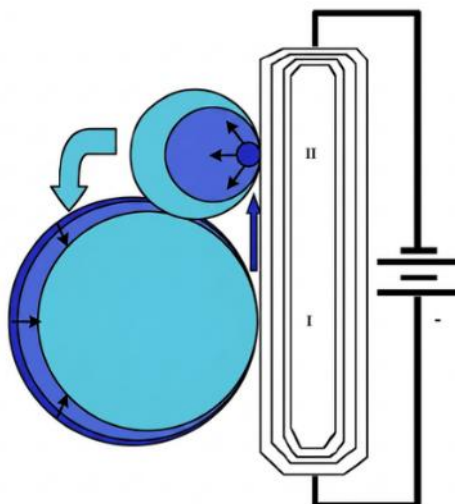


Рисунок 9. Наномотор на основе поверхностного натяжения [5]

Инженеры из Калифорнийского университета разработали «микроракеты» (рис. 10) с химическим приводом, способные довольно быстро перемещаться в кислых средах за счет расхода топлива (пероксида водорода H_2O_2).

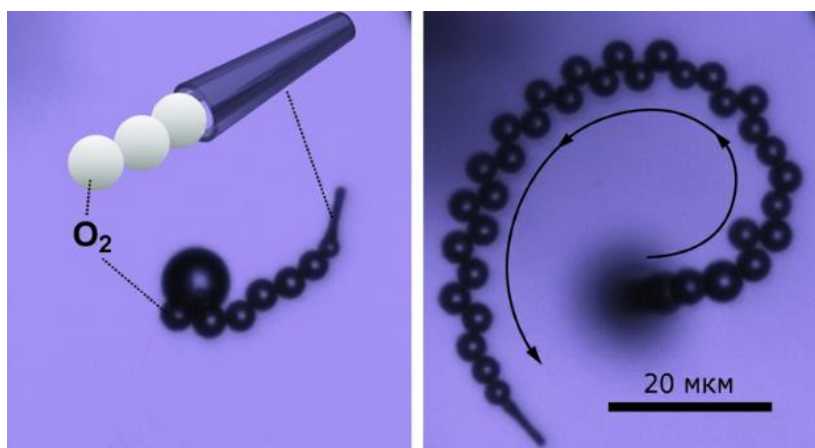


Рисунок 10. Цилиндрическая наноракета, выбрасывающая струю пузырьков кислорода [5]

Механизм действия химических наноактюаторов довольно прост: H_2O_2 разлагается на платине, которая находится на внутренней поверхности, помещенной в раствор микроразмерной цилиндрической трубки, происходящая реакция создает струю пузырьков кислорода, выбрасываемых назад, а сам снаряд идет вперед.

В некоторых случаях в качестве источника энергии целесообразно использовать свет (фотоны света), который, воздействуя на химические молекулы или специальное химическое соединение, приводит актюатор в движение. В частности, введение энергии в виде фотонов в некоторые химически активные соединения также может вызвать механическое движение за счет возникновения обратимых химических реакций, при чем без образования каких-либо отходов.

Были разработаны спиральные (магнитные) наномоторы, которые двигаются вперед, вкручиваясь, подобно штопору, поперек своей оси. В частности, исследователи из Южной Кореи предложили использовать внешнее магнитное поле для создания 2-х различных типов движений наноробота: «винтового» или штопорообразного и поступательного.

В первом случае наноробот под воздействием переменного электромагнитного поля способен перемещаться вперед/назад и «бури́ть» или другим образом разрушать перегородки в порах и каналах. Во втором — сворачивать в нужный канал (пору) в месте их разветвления и выполнять другие необходимые маневры, связанные с заданным перемещением в пористой системе.

Цепь из наноразмерных частиц из оксида железа может вводиться в поры горного массива — продуктивного коллектора. Под воздействием внешнего магнитного поля, частицы займут определенный угол, в итоге цепочка-робот примет форму штопора.

Направить штопор в область заблокированного участка продуктивного пласта также возможно, используя магнитное поле. Внедрившись в «пробку» поры, такой робот сможет пробить ее.

После того, как работа робота будет закончена, магнитное поле отключается, и цепочка рассыпается на отдельные частицы, которые выводятся из ремонтируемой области естественным способом.

В ходе проведенных лабораторных испытаний в макете пор и каналов, заполненного водой, ученые подтвердили высокую эффективность такого способа управления нанороботом. Важно и то, что для работы подобного наномотора не обязательно наличие внешнего электрического источника питания. Достаточно создать определенную разницу давлений.

Если заменить электроды на резервуары, заполненные определенным химическим веществом, то внешним изменением давления можно вызвать целенаправленное движение его атомов вдоль нанотрубки, что также вызовет вращение ротора подобного наноустройства.

Тепловые наноактюаторы используют эффект теплового расширения или деформации контакта 2-х или более материалов (довольно часто в виде пары «металл — диэлектрик»), появляющийся за счет наличия выраженного различия в коэффициентах их теплового расширения. Разогрев тепловых элементов подобного устройства осуществляют, пропуская через них электрический ток или вследствие целенаправленной подачи тепла.

Существует и другой принцип действия теплового наномотора — использование разницы температур между концами внешней нанотрубки, что вызывает поток электронов через нее и приводит к вращению такого наноротора.

Возможна работа наноактюаторов на основе использования пьезо-эффектов. Пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты заключаются в изменении линейных размеров наноматериалов в электрическом или магнитном поле.

Ученые из США создали наноактюатор в виде настраиваемого наномеханического резонатора на основе нанодиода из арсенида галлия (GaAs), толщиной 200 нанометров. При наложении небольшого переменного напряжения наблюдаются механические колебания резонатора, а при изменении частоты достигается механический резонанс.

Самое простое управление наноактюаторами обеспечивается путем воздействия электромагнитным полем.

Основой электромагнитного наноактюатора является 2-х слойная углеродная нанотрубка с разрывом посередине, внешняя часть которой соединена с 2-мя золотыми электродами. Внутренняя часть находится в свободном состоянии, представляя собой непосредственно ротор наномотора. Наглядное исполнение такого актюатора представлено на рисунке 11(а).

В другом варианте подобного устройства внешняя нанотрубка соединена с одним золотым электродом, в то время как внутренняя нанотрубка прикреплена к ртутному электроду, но сохраняет полную свободу вращения. Версия данного наноактюатора представлена на рисунке 11(б).

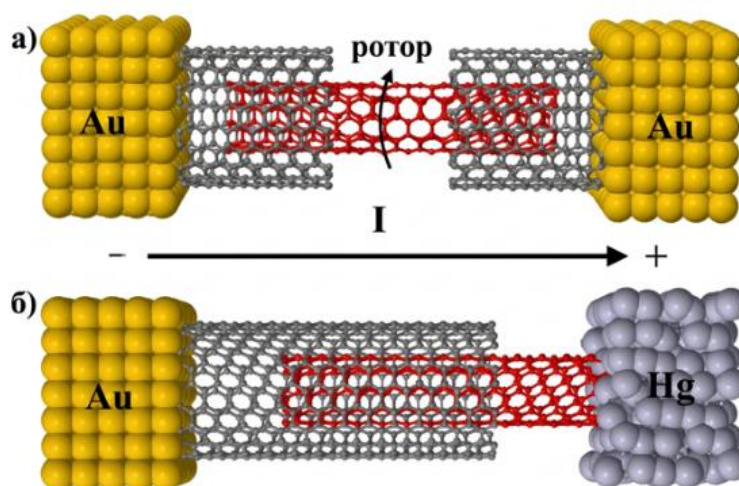


Рисунок 11. Наноактюатор с электромагнитным воздействием [5]:

(а) с двумя золотыми электродами; (б) с одним золотым и одним ртутным электродами

Если приложить электрическое напряжение между имеющимися электродами, то образуется электромагнитный момент, вызывающий вращение ротора — внутренней нанотрубки.

Вибрационный наноактюатор работает на основе использования сил, возникающих при определенных условиях вибрации. Благодаря явлению, известному как стохастический резонанс, всего лишь 1 молекула H_2 может быть использована для перемещения гораздо более массивного объекта.

Стохастический резонанс позволяет слабому периодическому сигналу усиливаться за счет окружающего молекулярного «шума». Резонанс возникает тогда, когда пики молекулярного шума случайно совпадают с пиками периодического сигнала.

Немецкие теоретики из университета Аугсбурга предложили модель наноэлектродвигателя, работающего на законах квантовой механики. Разработанный нанодвигатель представляет собой 2-е взаимодействующие частицы — 2 атома, располагающихся в кольцеобразной оптической решетке при довольно низкой температуре.

Первый атом — «носитель», второй — «стартер». Задача «стартера» заключается в инициировании запуска нанодвигателя и обеспечении движения в нужном направлении. Спустя некоторое время «носитель», уже под действием переменного сигнала в виде внешнего магнитного поля, выходит на пик своей возможной мощности: скорость движения этого атома достигает максимума и в дальнейшем остается постоянной.

Сдвиг фаз между компонентами внешнего поля играет ключевую роль — он позволяет целенаправленно управлять нанодвигателем, меняя значения скорости и направления движения «носителя».

Основные принципы проектирования нанороботов

Для дальнейшего повышения точности и надежности управления перемещением рабочих инструментов (наночастиц) по заранее заданной траектории на поверхности газогидратной залежи оказались необходимыми разработка и использование совершенно других методов, основанных на более «тонких» физических (химических) явлениях и эффектах, т. к. для разрушения ячеек газогидратов наночастицами может быть использована не только потенциальная энергия специально подаваемой гидродинамической струи [4].

Одним из важных и перспективных направлений применения нанотехнологий в нефтяной и газовой промышленности является создание и использование миниатюрных устройств, оснащенных микропроцессорами и способных самостоятельно четко выполнять целенаправленные операции с объектами нанометровых масштабов, получившие название «нанороботы».

Нанороботы — это роботы, сформированные из наноматериалов, обладающие функциями движения, возможностью получения, обработки и передачи необходимой информации, а также целенаправленного выполнения некоторых специальных программ. Размеры нанороботов не превышают нескольких нанометров [5].

Нанороботы могут выполнять очень разнообразные функции: передача сигналов в виде энергии, электронов, протонов и т. д., обработка поступившей информации (например, с помощью логической схемы молекулярного уровня), преобразование энергии (в частности, путем преобразования энергии света в электрохимический потенциал или химическое топливо и т. д.) и участие в ряде процессов механического типа (например, разрушении химических соединений, перемещении вещества и т. д.) [5].

Для перемещения в водной среде нанороботы оснащаются вращающимися жгутиками или подвижными плавниками.

Исследовательская группа Калифорнийского университета в Беркли реализовала специальную программу «Умная пыль», целью которой является создание макросистемы нанодатчиков, способных взаимодействовать между собой и с центром управления.

При распылении в заданной области наночастицы фиксируются на исследуемом объекте и представляют собой «рой» нанороботов, применяющихся в различных задачах. Система обеспечивает обнаружение труднодоступных объектов и осуществление непрерывного мониторинга окружающей среды. Наночастицы способны перехватывать, подавлять и модифицировать радиосигналы, а также воздействовать на процессы движения и управления объектами [5].

Чаще всего управление «роем» осуществляется с помощью спектроскопического метода: ядерный магнитный резонанс, поглощение ультрафиолетовой и видимой области спектра, люминесценция и т. д.

В общем случае наноробот должен состоять из следующих основных частей: источника энергии, наномотора (наноактюатора) различной степени сложности, системы обратной связи с оператором (возможно, с другими нанороботами), набора необходимых сенсоров, специальных движителей и специальных манипуляторов.

Концепция активного подавления гидратообразования на основе распределенных наноактюаторных структур

Традиционные методы ингибирования имеют ряд критических недостатков [9–14]. Термодинамические ингибиторы вводятся в поток точно и смешиваются с флюидом пассивно. В условиях многофазного потока и расслоения фаз концентрация реагента распределяется по длине трубопровода неравномерно.

Использование кинетических ингибиторов в форме наночастиц размером менее 1000 нм на основе поливинилпирролидона позволяет повысить эффективность предотвращения гидратообразования [15]. Данная технология обеспечивает доставку ингибитора непосредственно в ствол скважины, однако частицы по-прежнему перемещаются в потоке пассивно.

Концепция активного подавления предполагает переход к структурам, способным к самостоятельному движению и целенаправленному воздействию на критические зоны гидратообразования.

Основой концепции активного подавления гидратообразования является управление поведением магнитных наночастиц во внешнем переменном поле.

Экспериментально доказана возможность управления коллективным поведением магнитных частиц в потоке [16].

Группа исследователей из Института Макса Планка (Германия) и Корнеллского университета (США) продемонстрировала работу роя наноактюаторов диаметром 300 мкм. Вращаясь в магнитном поле, создаются вихри, способные перемещать объекты, в 45 тыс. раз превышающие массу одного наноактюатора без прямого контакта.

Скорость потока вблизи поверхности актюатора пропорциональна угловой скорости его вращения и равна приблизительно $2\pi\omega R$, где ω — частота вращения (об/с), R — радиус актюатора.

Каждый отдельный наноактюатор, двигаясь с определенной скоростью, создает вокруг себя вихрь, а при объединении их в рой наблюдается усиление вихревого воздействия на поток. По мере удаления от центра скорость убывает пропорционально квадрату расстояния, что характерно для течений при малых числах Рейнольдса.

Процесс создания кругового поля потока вокруг одиночного актюатора представлен на рисунке 12.

Схематичное изображение вращающегося наноактюатора представлено на рисунке 12А, а реальная картина течения с использованием мелких трейсерных частиц показана на рисунке 12В. Согласно экспериментальным данным на рисунке 12С, скорость потока находится в прямой линейной зависимости от частоты вращения магнитного поля.

График на рисунке 12D подтверждает, что скорость движения жидкости убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра актюатора.

Воздействие единичного наноактюатора минимально по сравнению с несколькими, объединенными в рой, соответственно, потенциала одного актюатора недостаточно для разрушения структуры гидрата.

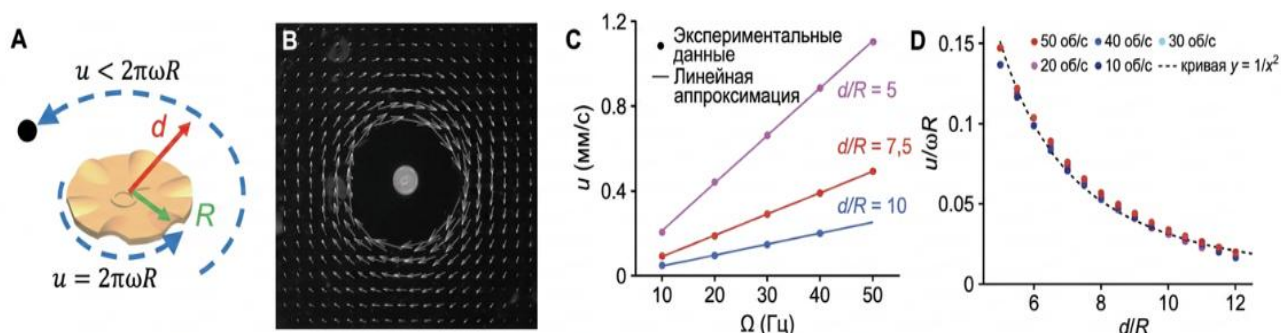


Рисунок 12. Характеристики поля скоростей и основные закономерности затухания потока вблизи одиночного вращающегося актюатора [16], где: (А) изображение вращающегося актюатора и основные параметры создаваемого кругового течения; (В) распределение скоростей и структура вихря с применением трейсерных частиц диаметром 3 мкм; (С) зависимость скорости потока от частоты внешнего магнитного поля для разных расстояний до центра актюатора; (D) результаты измерений нормированной скорости, подтверждающие затухание интенсивности потока

Следовательно, необходимо объединять наноактюаторы в рой, создающий большое количество однонаправленных вихревых потоков с достаточным моментом сил для воздействия на потенциальные места гидратообразования за счет суммирования скоростей [16].

При подавлении гидратообразования в НКТ физика вихревого воздействия фокусируется на процессах у стенки трубы. Гидрат зарождается в тонком диффузионном слое около металлической поверхности под влиянием низких температур и высокого давления. Рой актюаторов управляется внешним магнитным полем и непрерывно разрушает слой гидрата механическими потоками без участия химических реагентов. При частотах от 5 до 70 Гц скорость потока у края актюатора близка к линейной скорости его вращения, поэтому возникающие касательные напряжения намного превышают показатели обычного ламинарного течения внутри НКТ [16].

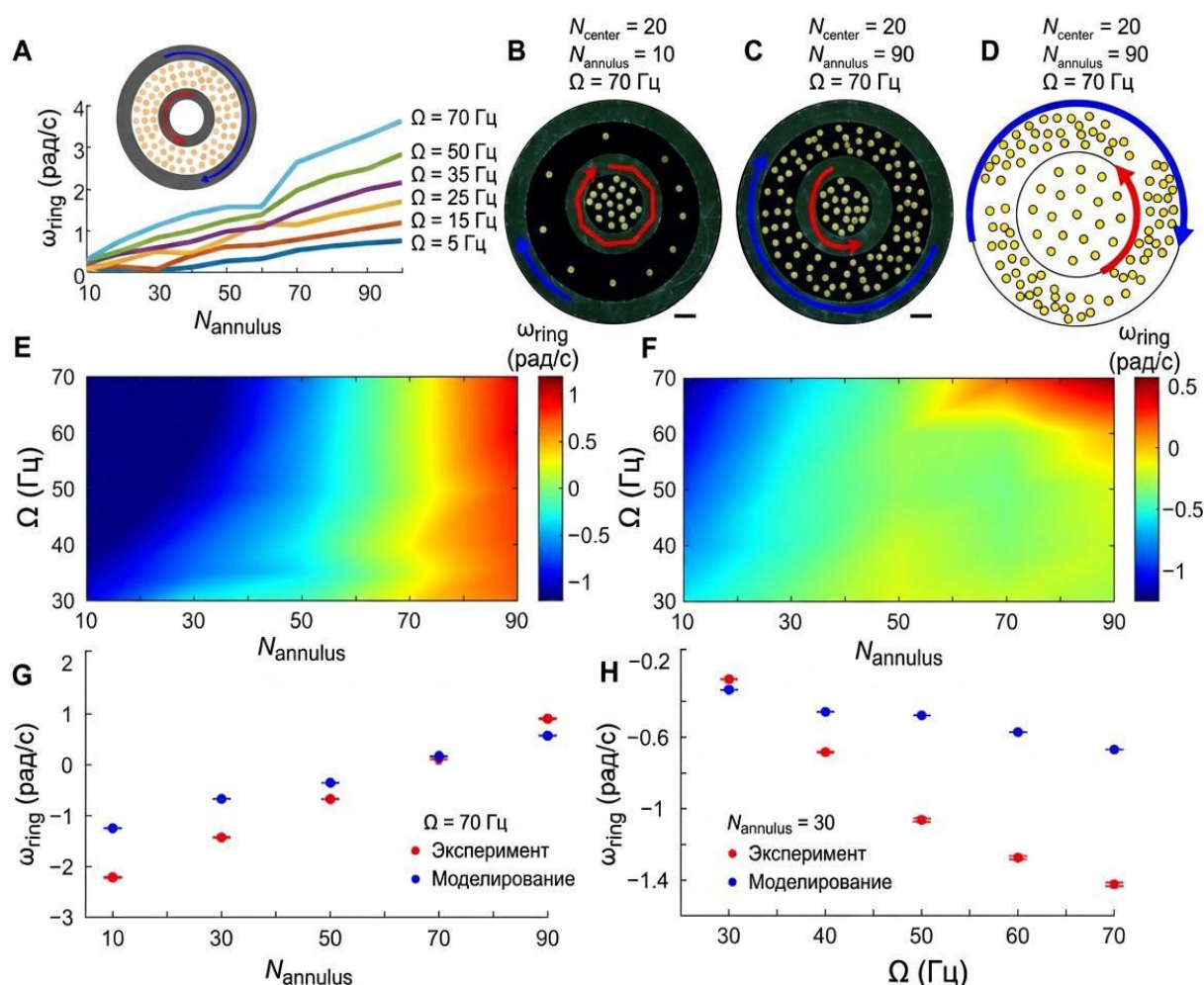


Рисунок 13. Результаты исследования совместного и встречного вращения концентрических колец под действием роя актюаторов при различных режимах работы [19], где: (А) график зависимости угловой скорости вращения внутреннего кольца от количества актюаторов в кольцевой зоне $N_{анн}$ при различных значениях частоты от 5 до 70 Гц; (В и С) распределение 20 центральных актюаторов и ,соответственно, 10 и 90 актюаторов в кольцевой зоне в экспериментальной установке при частоте 70 Гц; (D) результаты моделирования структуры вихревого потока и направления векторов скорости; (Е и F) ТЕПЛОВЫЕ карты распределения угловых скоростей от количества актюаторов в кольцевой зоне для внутреннего кольца при эксперименте и при моделировании; (G и H) графики угловой скорости внутреннего кольца в зависимости от параметров для экспериментов и моделирования

Коллективное поведение роя позволяет программировать направление и величину передаваемого на окружающие объекты крутящего момента путем изменения числа актюаторов и частоты поля.

Результаты исследования вращения модельных элементов под воздействием роя представлены на рисунке 13.

При наличии двух concentрических колец и частоты поля, равной 70 Гц, количество актюаторов во внутреннем ($N_{\text{центр}}$) и внешних ($N_{\text{анн}}$) кольцах определяют как направление, так и величину угловой скорости внутреннего кольца, как показано на рисунках 13 В и 13 С.

Внешнее кольцо подвержено влиянию наноактюаторов в области кольца и вращается в том же направлении, что и они.

Внутреннее кольцо испытывает крутящие моменты как от микророботов в центре, так и от микророботов в области кольца.

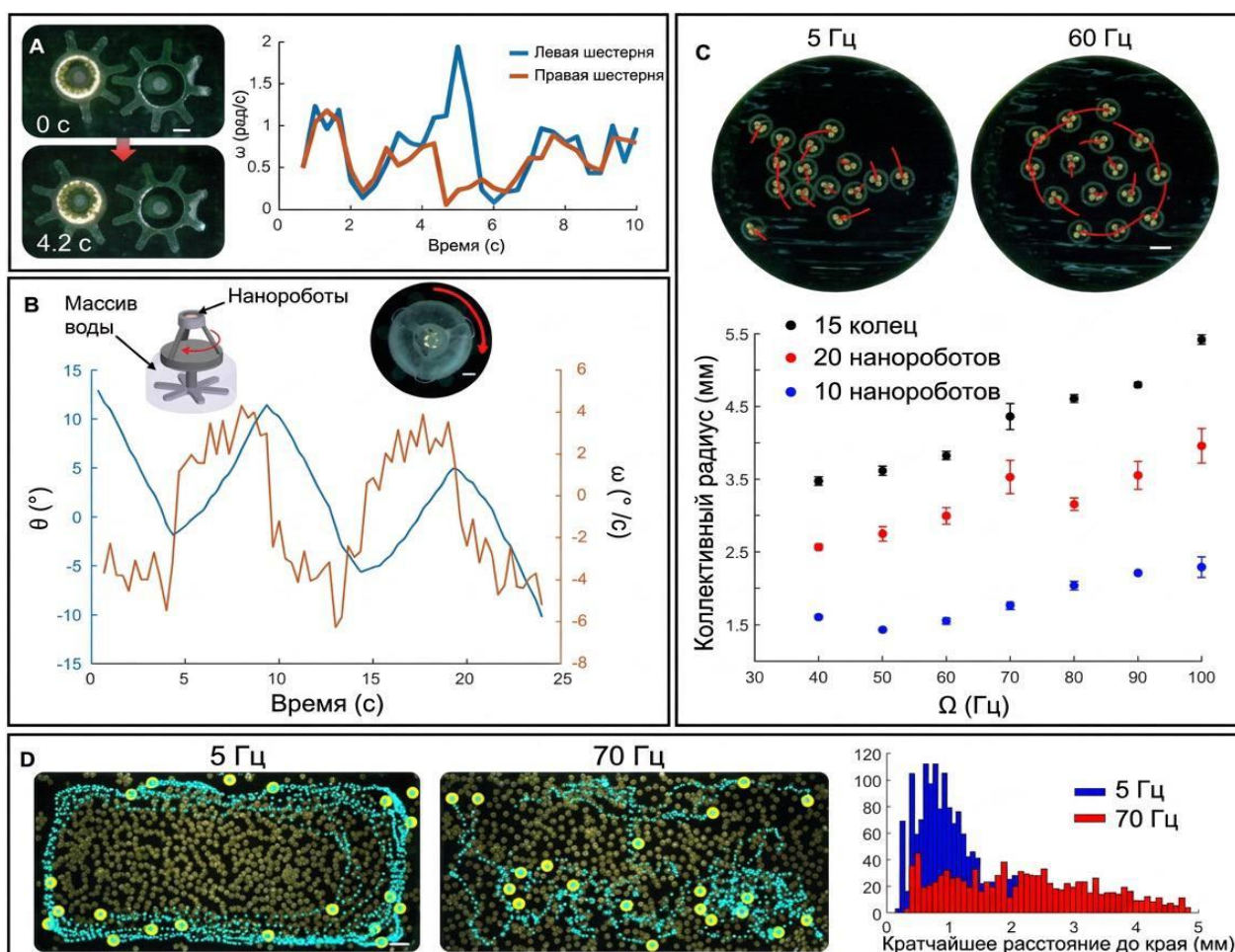


Рисунок 14. Демонстрация процессов активации самосборки и управления объектами под воздействием роя актюаторов [16], где: (А) рой из 40 актюаторов приводит в движение правую шестерню и график угловых скоростей левой и правой шестерен; (В) вращение объекта с массой в 45 000 раз больше массы одного актюатора при частоте 70 Гц; (С) динамическая самосборка 15 кольцевых структур и график изменения коллективного радиуса кольцевых структур в зависимости от частоты по сравнению с радиусом роя наноактюаторов; (D) распределение пассивных объектов при переключении роя из 1000 актюаторов между режимами 5 и 70 Гц для демонстрации смены механизма отталкивания на механизм захвата объектов

Когда в кольцевой зоне 10 актюаторов, то доминирует крутящий момент от актюаторов в центральной зоне, и внутреннее кольцо вращается в том же направлении, что и внешнее кольцо. Внутреннее кольцо вращается быстрее приблизительно на 2 рад/с или 115°/с, чем внешнее кольцо.

Когда в кольцевой зоне 90 актюаторов, то крутящий момент от актюаторов в кольцевой области преобладает, и внутреннее кольцо вращается в противоположном направлении от внешнего кольца с такой же разницей в угловой скорости (2 рад/с).

В рамках эксплуатации НКТ следует, что возможно создание устойчивого сдвигового течения заданной интенсивности около стенки трубы в той зоне, где начинается зарождение гидрата.

Сравнение экспериментальных данных с моделью на рисунках 13G и 13H подтверждает высокую точность расчетов и возможность прогнозирования механического воздействия роя на пограничный слой жидкости, что позволяет эффективно разрушать структуру зарождающегося гидрата без использования химических реагентов за счет передачи крутящего момента от магнитного поля через актюаторы.

Способность роя передавать механическое усилие на пассивные объекты позволяет управлять ими внутри потока флюида. Примеры приведения в действие различных объектов и самосборка с помощью роя приведены на рисунке 14.

Данные экспериментов подтверждают возможность вращения зубчатых колес и тяжелых трехмерных тел посредством вихревых потоков и воздействия роя актюаторов. Выявленные закономерности обосновывают метод разрушения гидратных пробок в НКТ, так как рой передает энергию на поверхность отложений через вихри и разрушает структуру гидрата без непосредственного контакта с металлической стенкой трубы. Переключение между режимами отталкивания и захвата объектов происходит за счет изменения частоты магнитного поля, что обеспечивает гибкость управления процессом очистки.

Особого внимания заслуживает эффект отталкивания и поглощения пассивных частиц, зафиксированный в опытах с роем из 1000 актюаторов и 20 пассивных объектов диаметром 1 мм. При низкой частоте поля (5 Гц) медленно вращающийся рой создает слабое сдвиговое напряжение, выталкивающее пассивные объекты к периметру. При высокой частоте (70 Гц) возникают более сильные азимутальные потоки и зоны рециркуляции, которые притягивают пассивные тела к центру роя [16].

В контексте НКТ рассматривается возможность программировать рой так, чтобы при стационарном режиме работы происходило удержание мелких частиц газовых гидратов в сдвиговом потоке, не давая им оседать на стенку, а при обнаружении признаков пробки осуществлялось переключение в режим захвата и транспортировки агрегатов к устью скважины.

Геометрия роя изменяется под влиянием формы ограничивающих поверхностей, что обеспечивает оптимальное распределение наноактюаторов в потоке. Примеры влияния взаимодействия с границами и формой объекта на организацию и движение роя приведены на рисунке 15.

Способность роя актюаторов принимать очертания препятствий позволяет частицам обтекать сложные участки или концентрироваться в нужных зонах НКТ.

Результаты экспериментов на рисунках 15 F и 15 K подтверждают прямую зависимость эффективности вращения от формы объекта, так как угловая скорость круглых тел при всех частотах превышает показатели для шестерни или стержня.

В условиях эксплуатации НКТ выявленная закономерность указывает на связь между формой гидратного осадка на стенке трубы и скоростью его механического разрушения вихревыми потоками. Использование режимов инкапсуляции и ползания позволяет подбирать параметры магнитного поля для максимально эффективного воздействия на отложения в зависимости от рельефа.

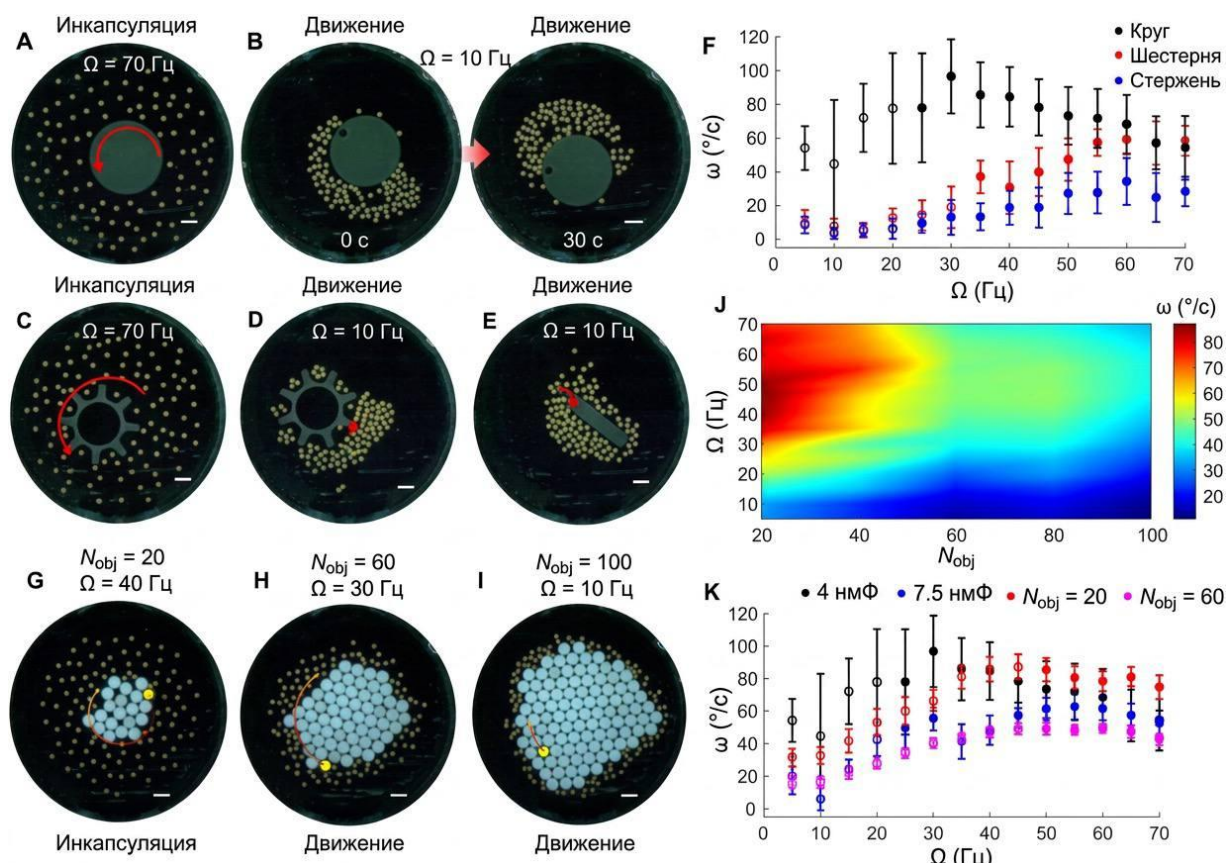


Рисунок 15. Характеристики адаптации роя актюаторов при взаимодействии с объектами круглой шестеренчатой и стержневой формы, включая режимы инкапсуляции и ползания [16], где: (А–Е) Фотографии процесса захвата и перемещения различных геометрических тел роем актюаторов при частотах от 10 до 70 Гц; (F и K) Графические зависимости угловой скорости вращения от частоты магнитного поля для объектов разной формы и различного количества; (G–I) Вращение круглых объектов группой из 100 наноактюаторов в течение 10 секунд; (J) Тепловая карта распределения скоростей во всем диапазоне исследованных параметров частоты и количества актюаторов

Результаты исследований закладывают количественную основу для проектирования роевых систем подавления гидратообразования [16].

Угловая скорость кольца линейно зависит от $N_{анн}$ при фиксированной частоте и от Ω при фиксированном числе актюаторов. Модели, построенные на гидродинамике малых чисел Рейнольдса, воспроизводят результаты экспериментов и служат инструментом выбора параметров, включая количество актюаторов, частоту поля и пространственное расположение.

Кроме того, поведение роя при воздействии на 3D-объекты остается таким же и в объемном флюиде (а не только на плоской межфазной поверхности), поскольку механизм определяется объемными гидродинамическими взаимодействиями, а вязкость жидкости задает лишь масштаб количественных параметров, что принципиально важно для обоснования переноса результатов с лабораторной модельной системы на условия многофазного потока в НКТ с повышенной вязкостью нефтеводяной эмульсии.

Заключение

Традиционные методы ингибирования основаны на равномерной подаче химических реагентов по всей длине трубы. Главный недостаток: данные методы не учитывают локальные колебания температуры и давления и не обеспечивают избирательного воздействия в зонах наибольшего риска образования гидратов.

Альтернативой служат наноактюаторы, представляющие собой устройства, которые преобразуют внешнюю энергию в направленное механическое воздействие на гидрат.

Среди многообразия видов наноактюаторов наибольший практический потенциал для применения в условиях НКТ демонстрируют магнитные актюаторы, управляемые внешним переменным полем.

Концепция активного подавления гидратообразования на основе управляемого роя магнитных наноактюаторов, формирующего целенаправленные вихревые потоки у стенки трубы, представляет перспективное направление борьбы с образованием гидратных отложений в НКТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А. Е. Основные принципы эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов // Наноинженерия. 2014. № 12. С. 3–7. EDN: TKPTYH.
2. Воробьев А. Е., Трабелсси С., Воробьев К. А. Возможности наноактюаторов в разработке аквальных залежей газогидратов // Бурение и нефть № 11. 2015. С. 10–17. EDN: UYGLDZ.
3. Воробьев А. Е. Основы механизма эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени Адмирала С. О. Макарова. 2014. № 6(28). С. 102–108. EDN: TDOCIN.
4. Воробьев А. Е., Трабелсси С. Возможности использования нанотехнологий при освоении газогидратных ресурсов // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы четырнадцатой международной конференции. Москва–Бишкек. — 14–20 сентября 2015 г. — М.: РУДН, 2015. С. 52–66. EDN: VYPXPV.
5. Воробьев А. Е., Абишев А. А. Нанотехнологии в освоении аквальных газогидратов // Вестник АИНГ, № 4(36), 2015. С. 3–14. EDN: AZHENP.
6. Атаев Д. Г., Гимаева А. Р. Методы и подходы в борьбе с образованием гидратов в нефтегазовых трубопроводах // Энергетическая политика. — 2025. — № 2(205). — С. 46–55. DOI 10.46920/2409-5516_2025_02205_46.
7. Кудрявцева М. С., Петухов А. Н., Шаблыкин Д. Н., Степанова Е. А. Моделирование влияния концентраций H_2S и CO_2 на гидратообразование смеси, приближенной по составу к природному газу // Журнал физической химии. — 2025. — Т. 99. — №6. — С. 887–894. DOI: 10.31857/S0044453725060085.
8. Кудрявцева М. С., Петухов А. Н., Шаблыкин Д. Н., Степанова Е. А., Воротынцев В. М. Расчет коэффициентов газогидратного распределения CO_2 и H_2S при извлечении из

- метансодержащей газовой смеси // Журн. физ. химии. — 2023. — Т. 97, № 4. — С. 481–485. DOI: 10.31857/S0044453723040192.
9. Ahmed I., Abbas S., Jamal F.Q., Ahmad I., Naseem A., Tahir A.M. Analysis of processed natural gas injection on hydrate formation in high pressure refrigerated condensate lines. *Heliyon*. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25811.
 10. O.E. Okon, J.A. Ajiengkab, S.S. Ikiensikimama, O.E. Akaranta Phytochemical characterization of selected agro-waste extracts as kinetic inhibitors in methane hydrates formation // *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. Art. 102429. DOI:10.1016/j.rineng.2024.102429.
 11. Gambelli A., Filippini M., Rossi F. An experimental comparison between methane and carbon dioxide hydrates formation: characterization of common aspects and differences between the two multiphase processes // *Heat Transfer Research*. 2022. Vol. 53. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2022040391.
 12. Umute O.M., Orji C.U. Subsea gas pipelines burst design incorporating hydrate plugging risk // *International Journal of Advances in Engineering and Management*. — 2025. — Vol. 7, No. 12. — P. 563–566. DOI: 10.35629/5252-0712563566.
 13. Li M., Liu J., Xia Y. Risk Prediction of Gas Hydrate Formation in the Wellbore and Subsea Gathering System of Deep-Water Turbidite Reservoirs: Case Analysis from the South China Sea // *Reservoir Science*. 2025. Vol. 1, No. 1. pp. 52–72. DOI: 10.62762/RS.20.
 14. Duan X., Zuo J., Li J., Tian Y., Zhu C., Gong L. Prediction of Gas Hydrate Formation in the Wellbore // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 14. Art. 5579. 10 p. DOI: 10.3390/en16145579.
 15. Makogon T. Research methods in flow assurance // *Handbook of Multiphase Flow Assurance*.: Elsevier, 2019. C. 221–442. DOI: 10.1016/B978-0-12-813062-9.00010-5.
 16. Ceron S. Fluidic torque-enabled object manipulation by microrobot collectives / S. Ceron, G. Gardi, K. Petersen [et al.] // *Science Advances*. 2026. Vol. 12, № 9. Art. eaca9947. DOI: 10.1126/sciadv.aea9947.

Sosulina Alexandra Evgenievna

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
E-mail: alexa.lina04@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1306667

Chekushina Tatiana Vladimirovna

Academician N.V. Melnikov Institute of Problems of Integrated Development of
Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
E-mail: council-ras@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

Vorobyov Kirill Alexandrovich

Academician N.V. Melnikov Institute of Problems of Integrated Development of
Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
E-mail: k.vorobyev98@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

Solovyov Alexander Nikolaevich

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
E-mail: 11422240075@pfur.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3716-2851>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1291504

Application of a controlled swarm of magnetic nanoactuators for hydrate formation prevention in tubing strings

Abstract. The article addresses the urgent scientific and technical problem of combating technological hydrate formation in production tubing during the operation of deep wells. Based on the analysis of the rapidly growing global market for flow assurance services in the oil and gas sector, the necessity of implementing fundamentally new high-tech solutions is justified. The authors thoroughly describe the technological and economic limitations of classic methods, such as chemical inhibition and passive thermal heating: non-uniform distribution of reagents in multi-phase fluid flows, significant financial expenses, and a lack of selective action and flexibility in high-risk zones.

As a highly efficient alternative, the article proposes a scientifically grounded concept of active suppression of hydrate deposits through the use of a coordinated swarm of distributed magnetic nanoactuators. The authors evaluate the efficiency of destroying crystalline clathrate cells depending on the morphology of the nanoparticles and demonstrate the advantages of electrochemically synthesized spherical structures known as «nano-urchins» with optimized spike geometry.

The proposed system operates under the influence of an external alternating magnetic field, the frequency of which determines the operational modes of the microrobots. The rotation of the swarm generates local, directional vortex flows in the near-wall zone of the pipeline, creating shear stresses that significantly exceed the parameters of the laminar flow. This allows for the continuous destruction of gas hydrates at the nucleation stage in the diffusion layer without using chemical reagents. Based on the hydrodynamic analysis of low Reynolds numbers, the article proves the capability of the swarm to switch between repulsion, capture, encapsulation, and transport modes of aggregates to the wellhead

when changing the field frequency from 5 to 70 Hz. The authors justify the scaling of simulation results from laboratory systems to the real-world conditions of multi-phase high-viscosity flows in tubing.

Keywords: nanoactuators; swarm; hydrate formation; tubing strings; magnetic nanoparticles; vortex flow; active suppression; deposit prevention; hydrodynamics; nanorobots