
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 53.06,530.182,531.3,532.5

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ.
ПРОРЫВНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ВОЛНОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

© 2019 г. Р. Ф. Ганиев

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, г. Москва, Россия
e-mail: rganiev@nwmitc.ac.ru

Поступила в редакцию 28.06.2019 г.
Принята к публикации 08.08.2019 г.

В статье представлены идеи и результаты (фрагменты) нелинейной волновой механики и волновых технологий, а также волновые машины и аппараты их реализующие, разработанные автором и его коллегами – сотрудниками “Научного центра нелинейной волновой механики и технологии ИМАШ РАН”, которые были изложены автором на Международной конференции “Машины, технологии и материалы для современного машиностроения”, посвященной 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова (ИМАШ РАН).

Ключевые слова: физика, механика, колебания, нелинейная волновая механика, волновые технологии, волновое машиностроение

DOI: [10.1134/S0235711919060051](https://doi.org/10.1134/S0235711919060051)

Нелинейная волновая механика – новая область механики, являющаяся научной базой так называемых волновых технологий, имеющих широкие приложения во многих отраслях техники: в машиностроении и в энергетике, в авиационно-космической технике, в нефтегазовой промышленности, в нефтехимии и нефтепереработке, в экологии, в материаловедении, в том числе при получении строительных материалов, наноматериалов – нанокомпозитов, в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, в медицинской технике и др.

Здесь вначале очень кратко описаны только некоторые типовые волновые явления и эффекты, установленные в процессе разработки нелинейной волновой механики, которые заложены в основу волновых технологий. Далее в процессе реализации волновых технологий в современной технике возникает, в свою очередь, необходимость в разработке соответствующих волновых машин и аппаратов, т.е. как развитие фундаментальных исследований в области машиностроения, так и создание нового направления машиностроения – ВОЛНОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ (в интересах различных отраслей техники, упомянутых выше).

Поэтому здесь также будут представлены основные определяющие типы волновых движителей, приводов, а также типовые волновые машины и аппараты и соответствующие волновые технологии, указаны перспективы их развития и области приложений в различных отраслях современной техники.

В последние годы возник ряд новых областей (направлений) нелинейной волновой механики и волновых технологий, особенно на стыке наук – физики, механики, химии. Эти направления также будут здесь упомянуты.

Следует особо подчеркнуть, что нелинейная волновая механика, волновые технологии и волновое машиностроение взаимосвязаны единой научно-технической базой (идеологией), основанной на нелинейных волновых принципах.

Таким образом, волновая механика (с ее новыми направлениями), волновые технологии, разработанные на волновых явлениях и эффектах, и соответствующие волновые машины и аппараты – волновое машиностроение, – в настоящем виде носят комплексный характер, созданы на нелинейных идеях – волновых принципах и в широком смысле этого слова взаимно дополняют и развиваются друг друга.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований в этой области широко опубликованы в России и за рубежом в многочисленных монографиях и статьях сотрудников НЦ НВМТ ИМАШ РАН, а ряд разработок и изобретений защищены патентами (соответствующие ссылки имеются в основном тексте работы).

Фундаментальные проблемы (научные основы):

1. Нелинейная волновая механика и волновые технологии. Отправной базовой научной основой является разработанная в ИМАШ РАН нелинейная волновая механика, имеющая российский приоритет. В процессе разработки этой новой области нелинейной механики открыт ряд нелинейных волновых и колебательных явлений и эффектов, которые положены в основу научных перспективных технологий, так называемых волновых технологий, получивших широкое распространение в России и за рубежом.

Далее ставится целью как существенное развитие фундаментальных проблем в области нелинейной волновой механики и волновых технологий, так и постановка, и решение новых научных и прикладных проблем на стыке наук: нелинейной механики, химии, физики – волновой механохимии.

В последние годы возникли принципиально новые области нелинейной волновой механики (направления):

2. Нелинейная волноводная микро- и макромеханика пористых сред, в том числе в нефтегазовых пластиах.

3. Волновая и волноводная микро-гидромеханика.

На этой основе выполняются исследования (научные и прикладные) по разработке новых перспективных направлений технологических процессов и соответствующих волновых машин, аппаратов и технологических линий (с системой управления и измерительной техникой), реализующих прорывные технологии, так называемое волновое машиностроение (высокоэнергетические аппараты с высоким КПД).

Нелинейная волновая механика и новые направления нелинейной механики (указанные выше) обязаны своим возникновением потребностям многих отраслей техники как с целью создания новых технологических (прорывных) процессов, так и необходимостью обеспечения надежности и бесшумности объектов современной техники (в авиационно-космической, в судостроении, гидрооборужениях (ГЭС) и др.).

В последние годы появились также новые экономикообразующие проблемы в области сельского хозяйства, как например, по глубокой переработке зерна (в частности, по получению модифицированных крахмалов); в здравоохранении – современной медицинской техники (в кардиологии, физиотерапии и т.д.).

Именно, конкретное ознакомление с современным состоянием самых различных отраслей промышленности (в нефтегазовой промышленности – повышение нефтегазоотдачи пластов, нефтехимия, нефтепереработка; материаловедении, сельском хозяйстве, пищевой промышленности, медицине и др.), а также современной техники (авиационной, судостроении, гидротехнических сооружений, в частности, при выяснении механизмов разрушения Саяно-Шушенской ГЭС (на основе анализа имеющихся данных)), и позволило нашему коллективу поставить для решения перспективные проблемы в области нелинейной механики и ее новых направлений, являющихся российским приоритетом, и опережающих мировой уровень науки и технологий.

Постановка проблемы по нелинейной волновой механике (теории нелинейных колебаний многофазных систем) и волновой технологии. Постановка проблемы нелинейной волновой механики – многоплановая, т.е. прежде всего это постановка и исследование нелинейных колебаний, волновых и волноводных процессов в различных механических системах: гидромеханических, многофазных системах, пористых и сыпучих средах, а также в твердых деформируемых системах, взаимодействующих с жидкостью и с газом, и т.д. При этом необходима их строгая математическая постановка, аналитические исследования и численный анализ с целью определения колебательных, волновых и волноводных явлений и эффектов с дальнейшим экспериментальным подтверждением. Далее необходима разработка возможных технических и технологических приложений.

Один из идейных характерных (центральных) моментов заключается в том, что именно за счет управления (пассивно или активно) колебательными или волновыми движениями рассматриваемой системы в условиях нелинейных резонансов ставится задача существенного изменения динамических характеристик, т.е. создание мощных дополнительных движений неколебательного характера (это только одна из постановок). При этом нелинейные резонансные соотношения имеют вид

$$\lambda_1 m_1 + \lambda_2 m_2 + \dots + \lambda_n m_n - \omega_1 p_1 - \omega_2 p_2 - \dots - \omega_k p_k \approx 0,$$

где m_i, p_j – малые целые числа; λ_i – собственные частоты; ω_j – частоты вынуждающих сил. Например, $\lambda_i \pm \lambda_j = \omega_k$, $\lambda_i = \frac{\omega_k}{n}$, $n = 1, 2, \dots, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$.

Таким образом, одна из типовых постановок заключается в проблеме создания радикальных форм движений (неколебательного характера) в гидродинамических, многофазных системах за счет нелинейных взаимодействий колебаний и волн, в том числе в условиях нелинейных резонансов. Здесь имеются также и другие постановки задач, которые породили различные области (направления) нелинейной волновой механики и волновых технологий, указанных выше.

Эти проблемы привели к разработке, постановке и решению достаточно широкого круга задач, взаимосвязанных с так называемой нелинейной “культурой”, объединенных единой областью нелинейной волновой механики и ее новыми направлениями. Ниже в обозримой форме представлены только отдельные результаты (фрагменты) фундаментального характера (колебательные и волновые явления и эффекты) без достаточно строгих математических моделей и методов их исследований; также некоторые типовые технологические процессы из различных отраслей промышленности. Более подробно эти результаты представлены в цитируемой литературе [1–16, 18, 21–25].

Типовые механические и математические модели. Уравнения движения многофазных сред. Волновые силы. Построены модели многофазных систем и установлены волновые силы, позволяющие создавать радикальные формы движений (неколебательного характера) отдельных фаз многофазной среды: мощные поступательные и периодические движения, реализующие интенсивное смешение, диспергирование, разделение и т.п. (рис. 1).

Теоретические установленные явления и эффекты подтверждены экспериментально. Ниже представлены простейшие типовые модели многофазных систем (рис. 2, 3) [1, 2, 5, 7, 10].

1. Твердые частицы, взвешенные в жидкости (рис. 2).

Уравнения движения

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i \vec{V}_i) = 0; \quad \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + \boxed{(\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_i} = -\frac{1}{\rho_i^0} \nabla P + \frac{1}{\rho_i^0} K_{ji} (\vec{V}_j - \vec{V}_i) + \vec{F}_i,$$

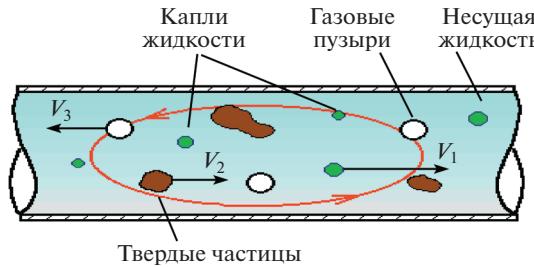


Рис. 1. Смешение, диспергирование и разделение многофазных сред.

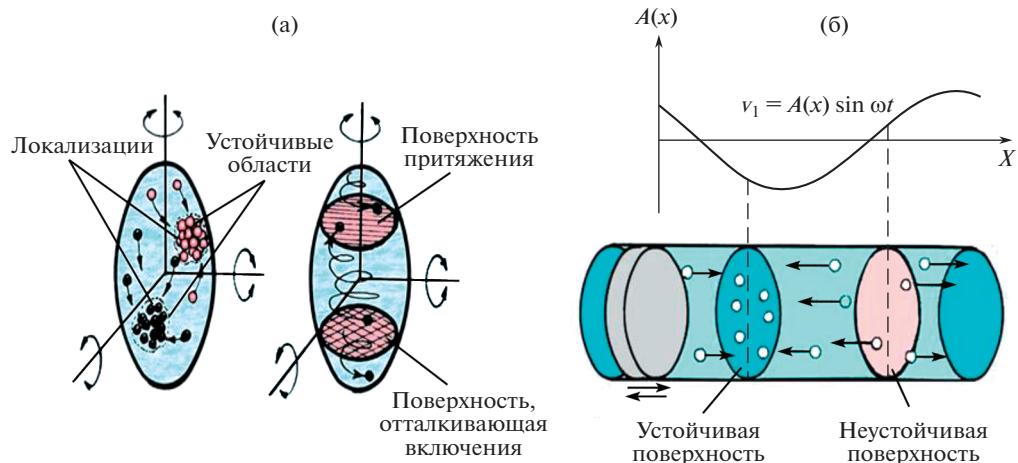


Рис. 2. Эффекты локализации (а), разделения и перемешивания частиц (б).

$$\rho_2 = \text{const}; \quad \frac{\rho_1}{\rho_1^0} + \frac{\rho_2}{\rho_2^0} = 1; \quad i = 1, 2; \quad j = 3.$$

Здесь P – давление, \vec{V}_i – скорости фаз, \vec{F}_i – массовые силы, c – скорость звука в несущей среде, ρ_i и ρ_j^0 – средние и истинные плотности фаз, K_{ji} – функция силового воздействия j -й фазы i -ю, $i = 1, 2$ – соответствуют фазе несущей среды и фазе твердых частиц (в рамке выделен нелинейный конвективный член).

2. Пульсирующие пузырьки газа, взвешенные в жидкости (рис. 3).

Уравнения движения

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \vec{V}_i) = 0, \quad i = 1, 2 \quad j = 3 - i;$$

$$\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + \left[(\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_i \right] = -\frac{1}{\rho_i^0} \nabla P + \frac{1}{\rho_i^0} \vec{K}_{ji} + \vec{F}_i; \quad \frac{\rho_1}{\rho_1^0} + \frac{\rho_2}{\rho_2^0} = 1;$$

$$\rho_2^0 R^3 = \text{const}; \quad P = P_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_0^0} \right)^n; \quad P_1 = \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma};$$

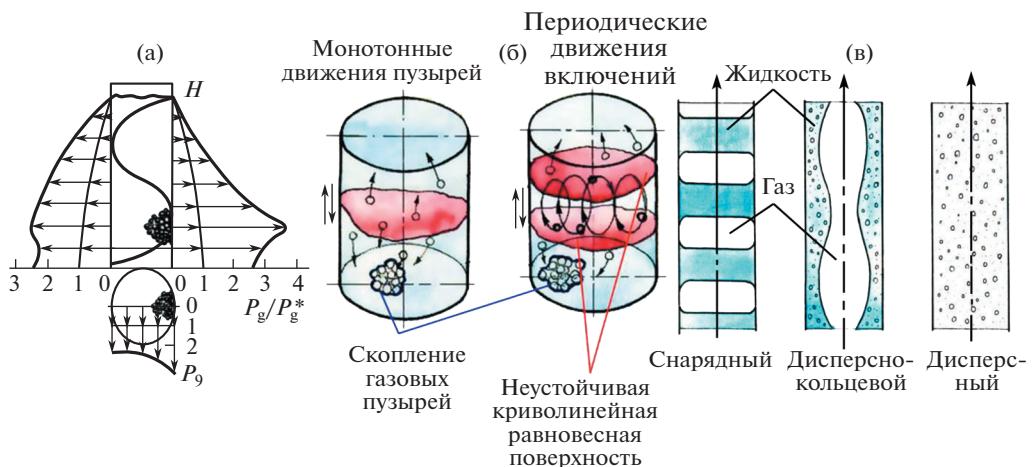


Рис. 3. Эффекты локализации пузырьков – дегазации и интенсивного резонансного перемешивания (а, б) и транспорта газожидкостных сред (в).

$$\begin{aligned} \ddot{R} + \frac{3}{2} \frac{\dot{R}^2}{R} + \frac{4\eta}{R^2 \rho_1^0} \dot{R} &= \frac{P_1 - P}{R \rho_1^0} + \frac{|\vec{V}_2 - \vec{V}_1|^2}{4R} + \frac{2\sigma}{R^2 \rho_1^0}, \\ \ddot{K}_{21} - \ddot{K}_{12} &= \frac{9\eta}{2R^2} \frac{\rho_2}{\rho_1^0} (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) + \frac{\rho_2 \rho_1}{\rho_2^0 R^3} \frac{d}{dt} \left[R^3 (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \right]. \end{aligned}$$

Здесь ρ_1^0 , ρ_2 , ρ_2^0 – средние и истинные плотности жидкости и фазы пузырьков; P_0 – давление жидкости при $\rho_1^0 = \rho_0$; ρ_0 – невозмущенное значение плотности жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения; η – коэффициент динамической вязкости жидкости; $i = 1, 2$ – соответствуют фазе несущей среды и фазе пузырьков. В рамке выделен нелинейный конвективный член, линией подчеркнуты нелинейные члены, связанные с неоднородностью течения возле колеблющегося пузырька.

Явления волновой турбулизации и стабилизации (рис 4). Нелинейные резонансные эффекты пространственного резонансного перемешивания протекают очень интенсивно при малых энергетических затратах.

Так величина энергии E , отнесенной на 1 кг растворимости кислорода: $\frac{E}{m_{O_2}} = 0.2 \frac{\text{кВт ч}}{\text{кг } O_2}$ – при использовании нелинейного резонансного эффекта пространственного перемешивания, в то время как промышленные показатели существующих традиционных установок составляют порядка $\frac{E}{m_{O_2}} = (1-6) \frac{\text{кВт ч}}{\text{кг } O_2}$; энергия при перемешивании 1 л воды ≈ 0.16 Вт ч.

Имеют место также эффекты локализации газовых пузырьков (рис. 4а) и стабилизации поверхности раздела фаз, т.е. возможно образование снарядных режимов (рис. 4г).

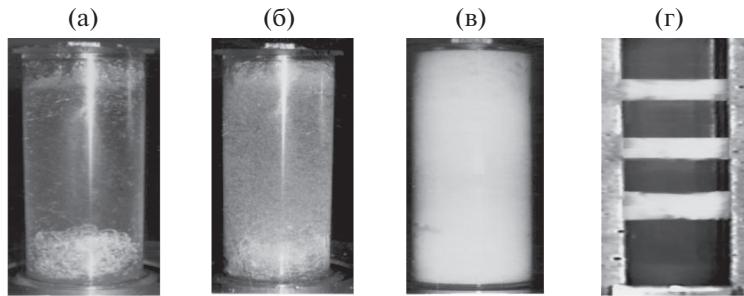


Рис. 4. Эффекты локализации (а), пространственного резонансного перемешивания (б, в) и стабилизации раздела фаз жидкость–газ (г).

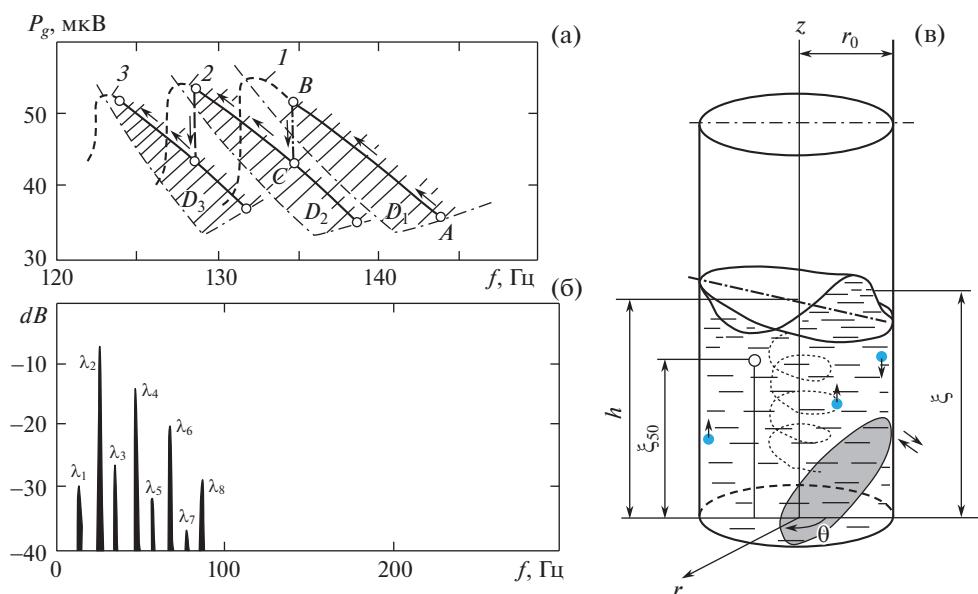


Рис. 5. Рассматриваемая модель пространственного резонансного перемешивания: амплитудно-частотные характеристики колебаний динамического давления в жидкости (а) и спектральные характеристики пульсаций давления в условиях нелинейных резонансов (б) при колебательных явлениях в системе жидкость–газ; (в) – спиральные движения пузырьков газа в колеблющейся жидкости со свободной поверхностью.

Движение пузырьков в волновых полях. Процессы смешения и резонансные области, соответствующие разным режимам движения

Пространственные формы движения пузырьков в условиях их проникновения в колеблющуюся жидкость со свободной поверхностью имеют спиральный характер движения и могут создавать мощное пространственное перемешивание (рис. 5в).

Эти эффекты могут найти приложения при разработке эффективных биореакторов и других технологических процессов – диспергирование, эмульгирование, дегазация и т.д.

На рис. 5а, б представлены АЧХ и спектральные характеристики модели мощного пространственного перемешивания в системе жидкость–газ в условиях нелинейных резонансов, соответствующая статическая картина представлена на рис. 4в.

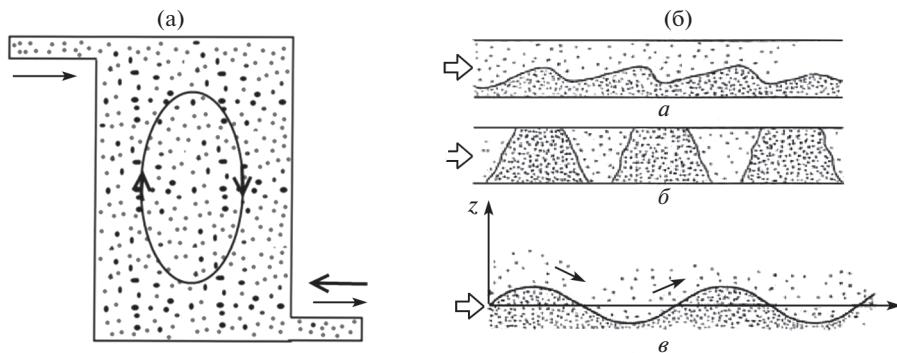


Рис. 6. Волновое резонансное перемешивание твердых частиц (а) и различные формы движений включений (б).

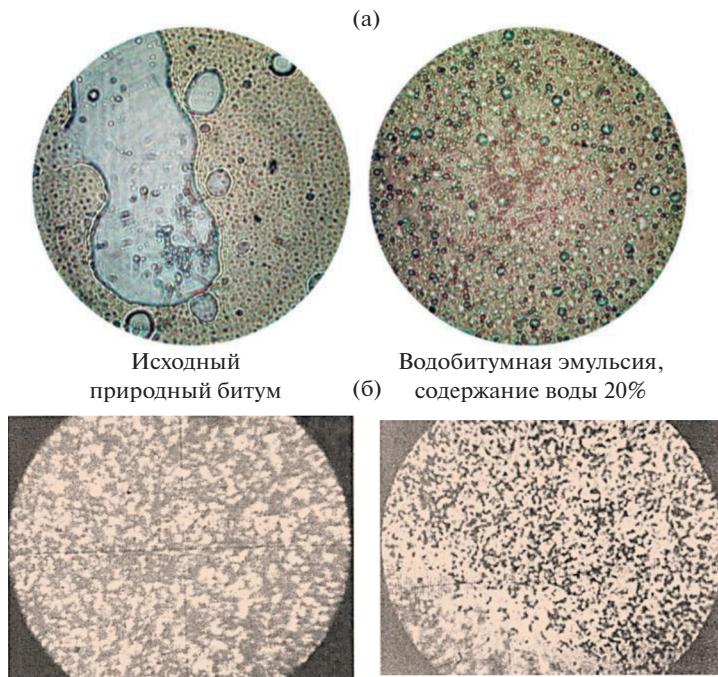


Рис. 7. Микрофотографии водо-битумной эмульсии (а) и краски (акриловой дисперсии) (б): краска до гомогенизации (слева) – размер агломератов частиц 15 мкм и после волновой гомогенизации (справа), средний размер агломератов 2 мкм.

Смешение, эмульгирование и диспергирование многофазных систем и сыпучих сред. Резонансные эффекты движений, перемешивания и транспорта многофазных сыпучих сред модулированным потоком несущего газа при малых энергозатратах (рис. 6).

Разработанная в НЦ НВМТ ИМАШ РАН волновая технология позволяет получать высокостойкие и тонкодисперсные (с каплями воды 1–3 мкм) водотопливные эмульсии, не расслаивающиеся в течение длительного времени (рис. 7) [1, 5–7, 9].

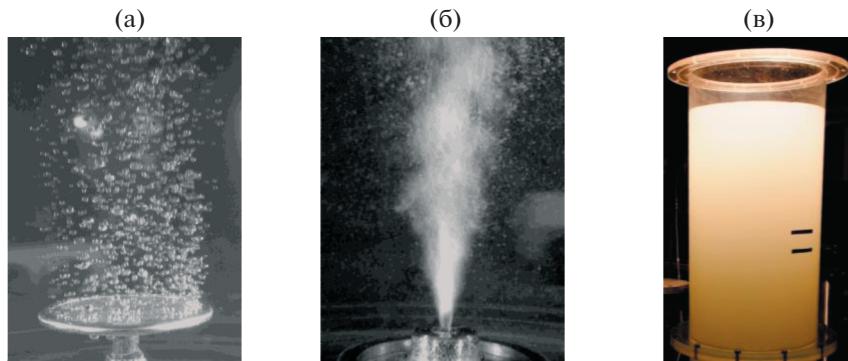


Рис. 8. Процессы диспергирования газа в жидкости: пористый диск на основе порошка титана (а); волновой диспергатор (б); газовый “туман” в жидкости, полученный волновым способом (в).

Для насыщения воды кислородом (рис. 8) с помощью волнового диспергатора требуются расходы воздуха и энергии примерно на 20% меньше, чем в случае пористых дисков, используемых в большинстве современных систем очистки воды. При волновой технологии диспергирования размеров пузырьков газа составляет порядка сотни микрометров (по традиционной технологии диаметры составляют порядка 2–3 мм.).

Такая технология может быть актуальна для многих задач химической технологии, в частности, систем биологической очистки сточных вод, хлорирования или озонирования водопроводной воды, в процессах, где происходит химическое взаимодействие жидкой и газовой фаз (химические и биореакторы и т.п.) и ряда других.

Результаты волновой технологии диспергирования углеродных нанотрубок (УНТ) в эпоксидной смоле. Работы по тонкому диспергированию и идеальному смешению наночастиц и нанотрубок выполнялись совместно с рядом организаций (ФГУП “ЦАГИ”, ИПХФ РАН, г. Черноголовка и др.) [6, 8, 13, 14]. При этом установлена высокая эффективность волновой технологии по сравнению с общепринятым методом ультразвуковой технологии при получении нанокомпозитов.

По волновой технологии произведено диспергирование 0.01% УНТ в составе клеевой композиции. Данная концентрация обеспечила повышение механических характеристик, сопоставимое с полученной при ультразвуковом диспергировании концентрации 2% УНТ (т.е. в 200 раз большей). При применении волновых технологий потребуется меньшее количество дорогостоящего наноматериала, что важно с экономической точки зрения.

Полученные оптические и электронные микрофотографии подтверждают высокое качество волнового диспергирования агломератов, формируемых УНТ в свободном состоянии. Видно, что размер агломератов при волновом диспергировании уменьшается в ~10³–10⁴ раз при равномерном распределении в эпоксидной матрице, по сравнению с ультразвуковыми методами (рис. 9).

Эти результаты имеют широкие перспективы по получению материалов, композитов, нанокомпозитов с уникальными свойствами.

Распространение нелинейных волн в насыщенной пористой среде [1]

На рис. 10 можно видеть, что возможно усиление распространения высокочастотных волн (кривая 2, $f = 25$ кГц) за счет низкочастотных (кривая 1, $f = 1$ кГц).

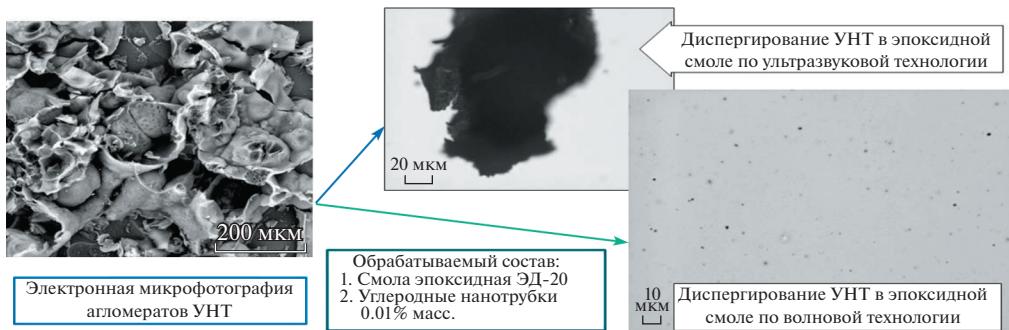


Рис. 9. Диспергирование углеродных нанотрубок в эпоксидных смолах.

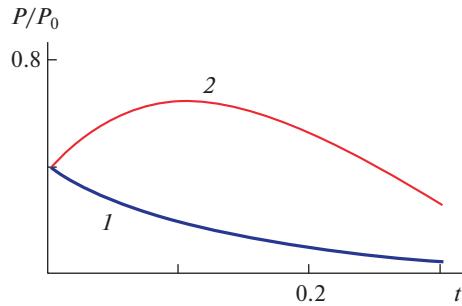


Рис. 10. Нелинейное усиление волн в пористой среде (нелинейное взаимодействие волн в пористых средах).

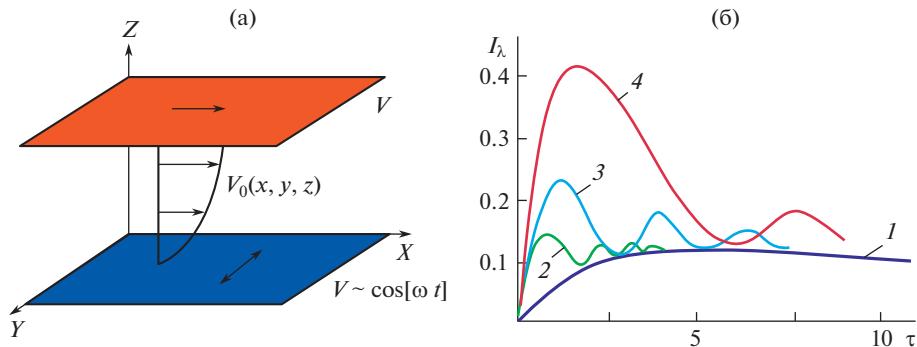


Рис. 11. Процесс смещения в вязкопластичных средах (работа была выполнена по контракту с компанией Bruckner, Германия).

На рис. 11а показано, что за счет продольных колебаний среды возможно (за счет нелинейных взаимодействий) поступательное движение и наоборот. На рис. 11б показан график интенсивности перемешивания I_λ для традиционных перемешивающих аппаратов (кривая 1), вибрационных машин (кривые 2, 3) и волновых перемешивающих устройств (кривая 4).

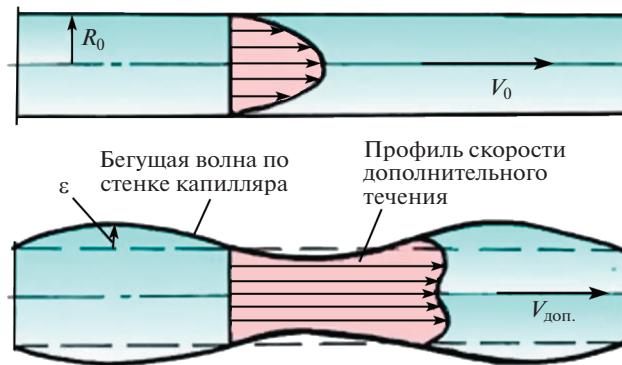


Рис. 12. Многократное повышение скорости жидкой среды в капиллярах (при весьма малых амплитудах бегущих волн стенок (до 1/1000 радиуса)).

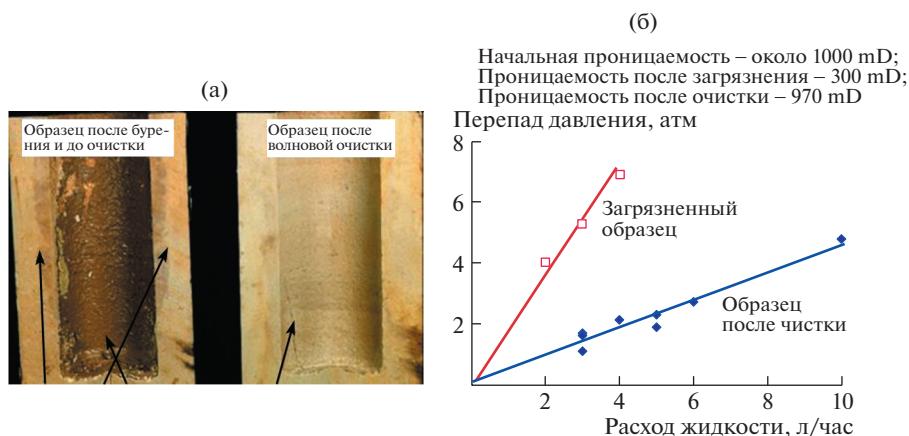


Рис. 13. Лабораторные испытания волновой технологии очистки скважин, проведенные на уникальных стендах в исследовательском институте компании “Шелл” (совместные работы): (а) очистка и доводка пробуренных скважин; (б) график проницаемости загрязненного и очищенного кернов породы.

Капиллярный эффект и повышение проницаемости пористых сред (рис. 12, 13, табл. 1)

Наблюдается повышение проницаемости (до 4-х раз) при волновой обработке скважин. В экспериментах были практически реальные условия обработки нефтяных скважин (давления и расходы буровой жидкости, образцы породы и т.п.).

Таблица 1. Дополнительное увеличение скорости течения жидкости в различных каналах за счет нелинейных волновых эффектов

Вид капилляра	R_0 (м)	V_0 (м/с)	ε/R_0	$V_{\text{доп}}/V_{\text{ср}} (\%)$
канал	10^{-2}	25	10^{-3}	1.56
трещина	10^{-3}	0.25	10^{-3}	137.6
пора	10^{-5}	2.5×10^{-5}	10^{-3}	1.8×10^5 ($\uparrow 10^3$ раз)

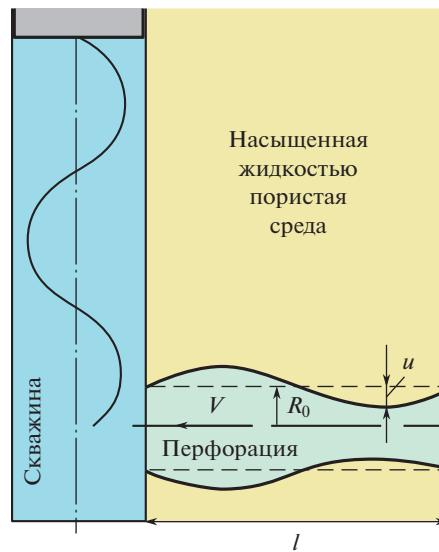


Рис. 14. Волновой резонанс на перфорационном отверстии на забое скважины. Модельная постановка.

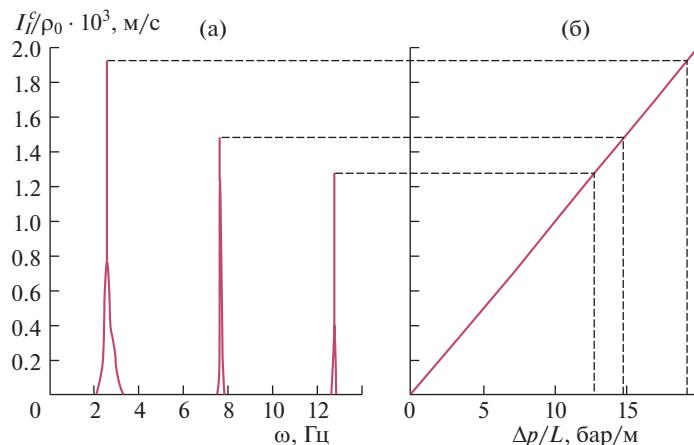


Рис. 15. Зависимости фильтрационного потока от частоты возбуждения ω (а); зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации согласно закону Дарси (б).

Резонансы в пористых средах. Волноводная механика пористых сред (интенсификация нефтедобычи и нефтеотдачи пластов) (рис. 14, 15) [1, 3, 4]

Волновое воздействие может возбуждать такие фильтрационные течения, которые в стационарном случае могут быть обусловлены огромным градиентом давления, практически недостижимым на практике (с учетом капиллярных эффектов – рис. 12).

Математическая модель вынужденных колебаний насыщенного жидкостью слоя пористо-упругой среды

Уравнения движения (модель Био)

$$\frac{\partial m \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(m \rho u) = 0, \quad \frac{\partial (1-m) \rho'}{\partial t} + \operatorname{div}[(1-m) \rho' u] = 0;$$

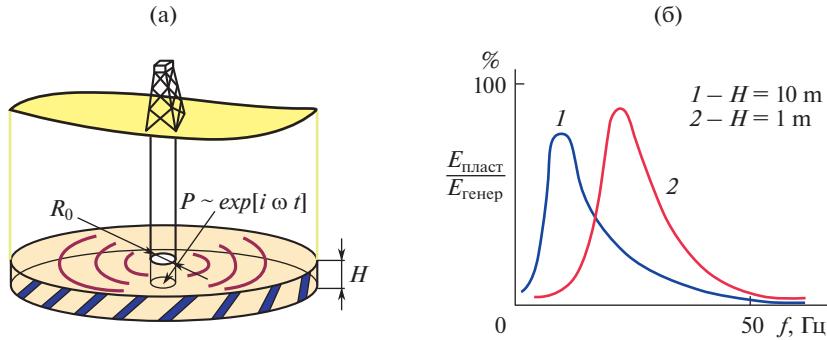


Рис. 16. Резонансная накачка пласта (H – толщина пласта; f – частота волнового воздействия; $E_{\text{пласт}}$ – мощность, переданная в пласт; $E_{\text{генер}}$ – мощность генератора).

$$\begin{aligned}
 m\rho \frac{du}{dt} + (1-m)\rho' \frac{dw}{dt} &= -\text{grad } p + \text{div } \sigma, \\
 m\rho[1 + \alpha(1-m)] \frac{du}{dt} - m\alpha\rho(1-m) \frac{dw}{dt} &= -m\text{grad } p - \frac{\mu m}{k}(u - w), \\
 \sigma = (1-m)(\lambda + 2\gamma)E + \lambda\beta_2 p, \quad \frac{\partial E}{\partial t} &= \text{div } w, \\
 \rho = \rho_0[1 + \beta_1(p - p_0)], \quad p' = p_0[1 + \beta_2(p - p_0 - (\lambda + 2\gamma)E)].
 \end{aligned}$$

Границные условия: $w(r, 0) = u_z(r, 0) = 0$, $\sigma_z(r, H) = Z_0 w_z(r, H)$, $w_z(r, H) = u_z(r, H)$, $\sigma_r(r, H) = 0$, $\sigma_z(R_0, h) = 0$, $\sigma_r(R_0, h) = \lambda\beta_2 P$, $r > R_0$ – нижняя и верхняя плоскости, $h \in (0, H)$ – центральное отверстие. Здесь u, w – скорости жидкости и скелета породы; ρ, ρ' – плотности жидкости и породы; m, k – пористость и проницаемость породы; σ – тензор напряжений в среде; λ, γ – модули объемной упругости и сдвига скелета породы; μ – динамическая вязкость жидкости; p – давление; ρ_0, ρ'_0 – значение плотностей при $p = p_0$; α – коэффициент присоединенной массы; E – деформация скелета; β_1, β_2 – сжимаемость жидкости и материала породы; Z_0 – импеданс верхней границы.

Эта математическая модель была положена при обработке (при малых воздействиях) на целых месторождениях с целью повышения нефтеотдачи пластов в истощенных месторождениях и в настоящее время широко внедряется в практику (рис. 16).

Волноводы в нефтяных пластах (естественные и искусственные волноводы, двух- и трехмерные волны) (рис. 17–21) [3, 4]

Здесь представлены лишь фрагменты волноводной механики пористых сред созданный авторами работы [3, 4], которые в настоящее время внедряются на практике. Это область является принципиально новой и имеет высокие перспективы как в нефтяной промышленности (при повышении нефтеотдачи пластов), так и в других областях техники.

Стабилизация волновых процессов. Ламинаризация и турбулизация потоков (рис. 22). Бесшумность, надежность и уменьшение гидравлических сопротивлений трубопроводных систем и плавающих объектов [1, 7]

Математическая модель

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0; \quad \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} \right] = -\nabla P + \eta \Delta \vec{V} + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad} \text{div} \vec{V}$$

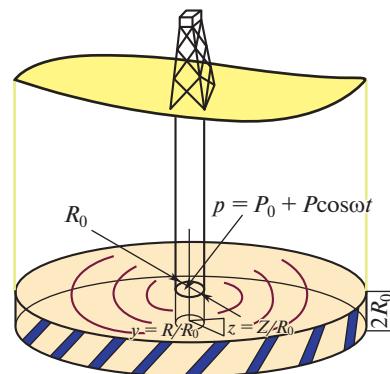


Рис. 17. Эффективная и направленная накачка энергии волн в заданные пропластки в условиях резонансов.

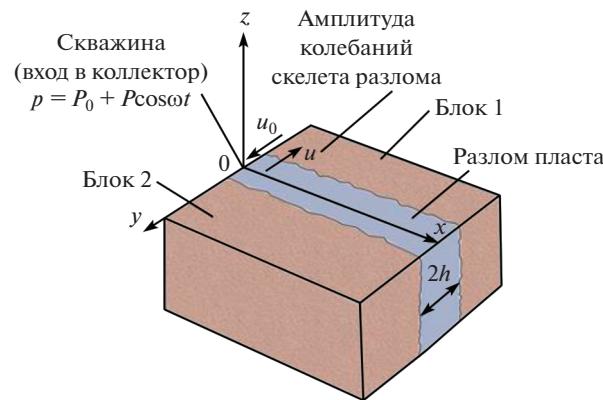


Рис. 18. Волноводные процессы в пористых средах с неоднородностями. Распределение по волноводу сил, действующих на загрязняющие поры твердые частицы и капли капиллярно удерживаемой нефти.

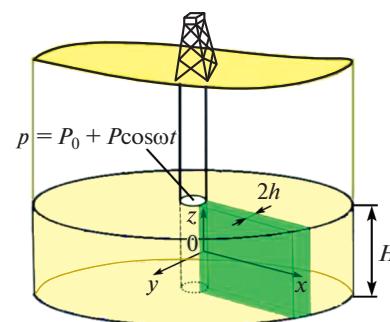


Рис. 19. Резонанс двумерных плоских волн в разделяющих пласт на блоки вертикальных разломов и зонах трещиноватости.

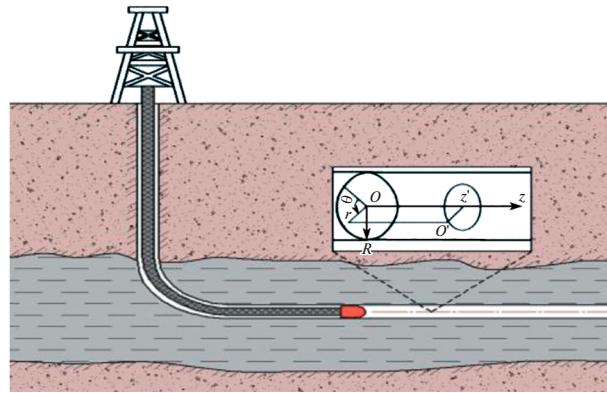


Рис. 20. Обработка горизонтальных скважин с колтюбингом.

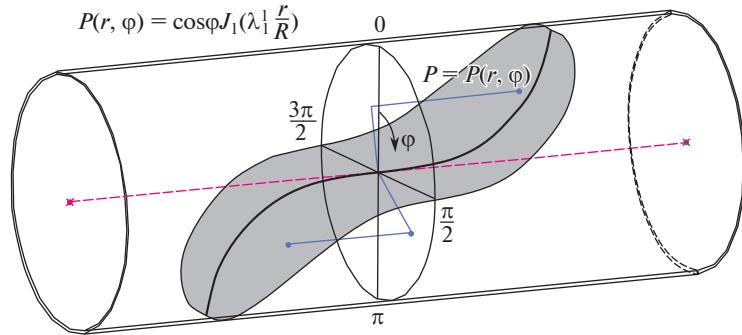


Рис. 21. Распределение амплитуд колебаний давления в волне с неосесимметричной формой. Максимальная амплитуда колебаний давления достигается при $r = R$ на стенке трубы, что обуславливает преимущество данной формы для очистки стенок скважины от загрязнений.

Кинематические и динамические граничные условия

$$\vec{V}|_{\Sigma} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}; \quad N\vec{u} = D(P, \vec{V})|_{\Sigma}$$

Полученные теоретические результаты о возможности ламиризации потоков подтверждены экспериментами.

Эти результаты в настоящее время развиваются для повышения эффективности трубопроводного транспорта нефти различной вязкости, обеспечения бесшумности плавающих объектов современной техники и др.

Разработка опытных трубопроводов с упругодемпфирующими и теплоизолирующими покрытиями (рис. 23, 24)

Основные преимущества: повышение производительности до 30%; увеличение энергоэффективности транспорта; уменьшение интенсивности образования асфальтосмолапарфиновых отложений на стенах трубопровода.

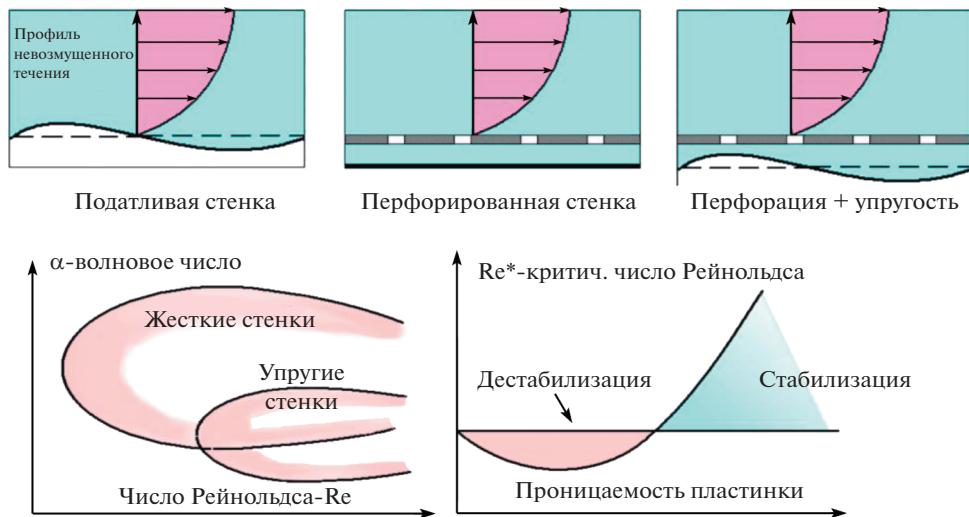


Рис. 22. Гашение упругих волн и стабилизация течений жидкостей в трубопроводах.

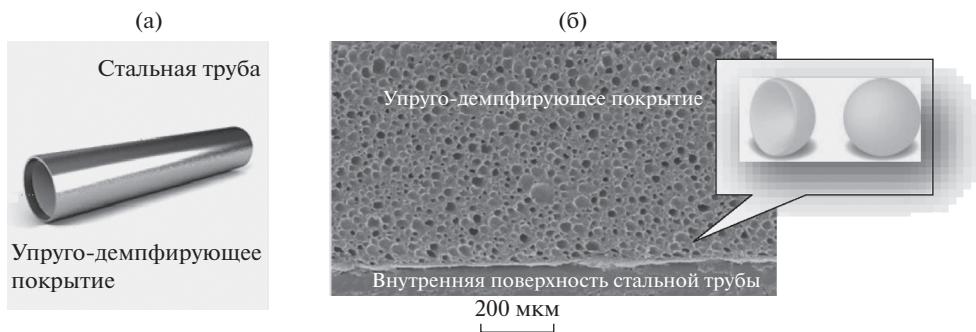


Рис. 23. Конструкция трубопровода (а) и структура упругодемпфирующего покрытия (б) в системах специальных упругих сферических наполнителей со средним размером частиц 30–50 мкм.

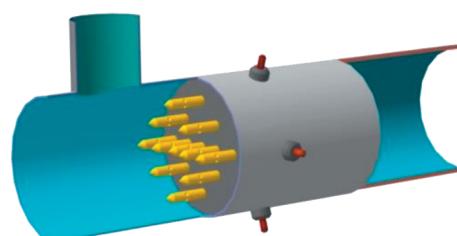


Рис. 24. Макет опытной полупромышленной трубопроводной системы транспорта сверхвязких нефтей.



Рис. 25. Общий вид роторно-волнового мельничного агрегата.



Рис. 26. Технологический комплекс сверхтонкого помола.



Рис. 27. Увеличение подвижности цемента.

Измельчение с установленными конкурентными преимуществами (рис. 25–27). В области материаловедения получен ряд результатов по созданию эффективных волновых процессов диспергирования, эмульгирования и смешения различных сред, эти результаты изложены в работах [6, 8].

Высокая степень измельчения. Получены уникальные результаты при измельчении известняка и мрамора, каменного угля и доменного шлака (табл. 2).

До 70% выхода продукта имеют дисперсность менее 5 мкм всего за один цикл измельчения. Причем для этого оказалась достаточной скорость поверхности ротора ме-

Таблица 2. Результаты измельчения некоторых материалов на волновой мельнице

Обрабатываемый материал	Дисперсность после помола				
	от 10 до 560 нм	до 1 мкм	до 5 мкм	до 10 мкм	до 25 мкм
Известняк (волновая обработка)	10%	до 30%	85%	90%	99%
Известняк (шаровые мельницы)					90%
Камен. уголь (волновая обработка)			21.9%	43.8%	75%
Доменный шлак (волновая обработка)			20%	30%	55%

нее 80 метров в секунду, хотя, обычно для достижения таких результатов используют многостадийный процесс измельчения, а скорости поверхности ротора достигают 200 и даже 250 метров в секунду.

Повышение тонкости помола до 5 мкм известняка, при использовании роторно-волновых мельниц, эффективно решает технологическую проблему производства карбонатных цементов с заменой до 20% дорогостоящего клинкерного цемента на известняковую составляющую, что может обеспечить строительному комплексу России дополнительно 10 млн тонн высококачественного вяжущего без введения новых производственных мощностей по производству портландцемента: низкие энергозатраты; повышенный ресурс; высокая чистота продукта; возможность получать материалы с новыми свойствами.

В измельчителе осуществлен принцип комбинированного воздействия, сочетающий регулируемое ударное воздействие на обрабатываемую среду с ее волновой турбулизацией.

Волновая турбулизация позволяет: ликвидировать застойные зоны, образующиеся обычно на периферии мельниц ударно-отражательного действия за счет действия центробежных сил; увеличить количество столкновений частиц обрабатываемого материала.

В результате активации известняк приобретает вяжущие свойства, что позволит экономить цемент до 30%, создавать угольные мазуты, извлекать ценные металлы.

Кавитационно-волновые процессы. Движители волновых машин и аппаратов. Гидродинамические генераторы колебаний и волн (рис. 28–31). На основе математического моделирования разработаны гидродинамические генераторы нелинейных волн без подвижных частей, являющиеся основными узлами – движителями машин и аппаратов, реализующих различные волновые технологии, они не могут разрабатываться эмпирическим путем.

Математическое моделирование (рис. 32–35)

Соответствующие волновые аппараты обладают высоким КПД, поэтому они наиболее эффективны при разработке высокономичных технологий.

Перемешивание в гидродинамических системах и установках колебательного типа (в основе волновых аппаратов) [12, 18]

С помощью методов компьютерного моделирования было исследовано влияние пространственного размещения рабочих элементов в установках колебательного типа (рис. 36, 37). Предложен подход к оптимизации расположения лопаток в пространстве, основанный на отслеживании траектории каждой из частиц примеси. Это создает предпосылки для автоматизации процесса проектирования волновых перемешивающих устройств.



Рис. 28. Различные типы гидродинамических генераторов колебаний и волн.

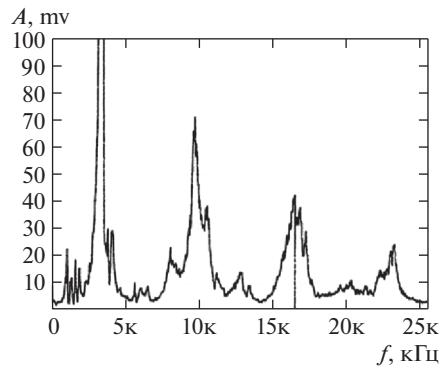


Рис. 29. Многочастотный спектр проточного гидродинамического волнового генератора.

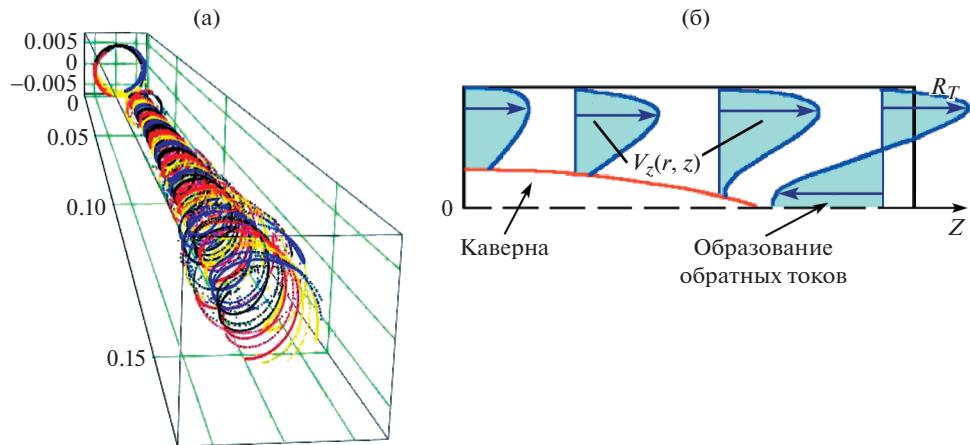


Рис. 30. Картинка траекторий частиц перемешиваемой среды (а) и типовой профиль скорости (б) в генераторе вихревого типа.

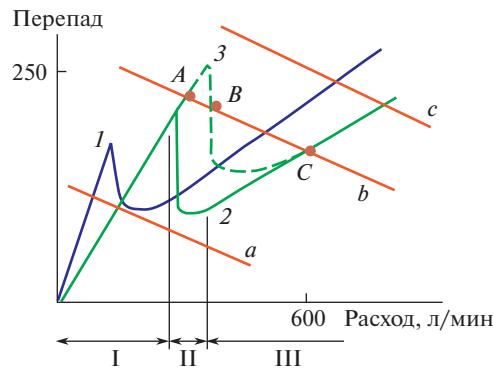


Рис. 31. Механизмы возникновения автоколебательных процессов в проточных каналах гидродинамических генераторов: I – каверна отсутствует; образуется развитое обратное течение; II – аномальное поведение перепада давления, вызванное появлением каверны; перестройка течения – область обратных токов сокращается; III – каверна достигает выходного сечения генератора, обратное течение минимально; точки A, B, C – возможны неустойчивые режимы течения. Линии a, b, c – расходные характеристики насосов.

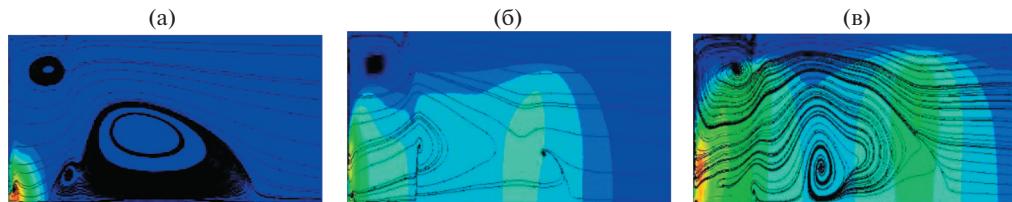


Рис. 32. Картина течения в вихревом генераторе (критерии появления управляемых процессов кавитации): (а) начало кавитации, (б) развитая кавитация, (в) интенсивная кавитация.

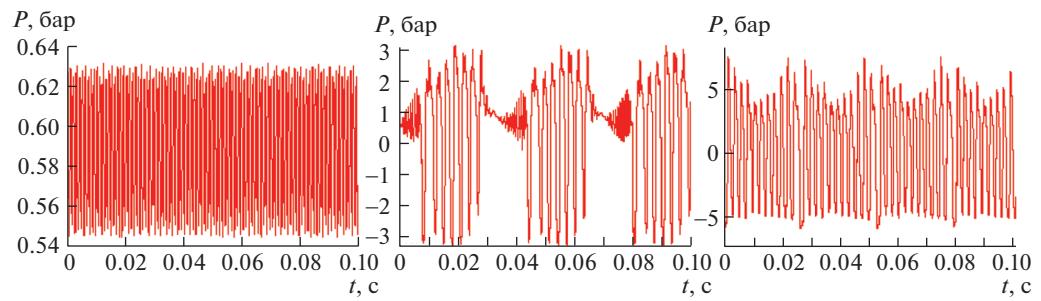


Рис. 33. Пульсации давления на оси (автоколебательные процессы).

Обобщенные научно-технические результаты (эффекты) – волновые силы и волновые механизмы движений. Здесь представлены лишь наиболее существенные результаты: 1) создание мощных направленных потоков и управляемых кавитационно-волновых процессов, которые пробивают стальные изделия толщиной 5–10 мм; 2) создание управляемых процессов турбулизации и ламинаризации потоков, повышающих бес-

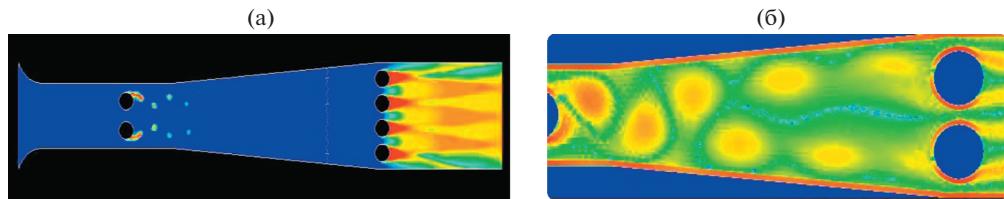


Рис. 34. Концентрация парогазовой фазы (а) и поле завихренности (б) в плоском проточном тракте.

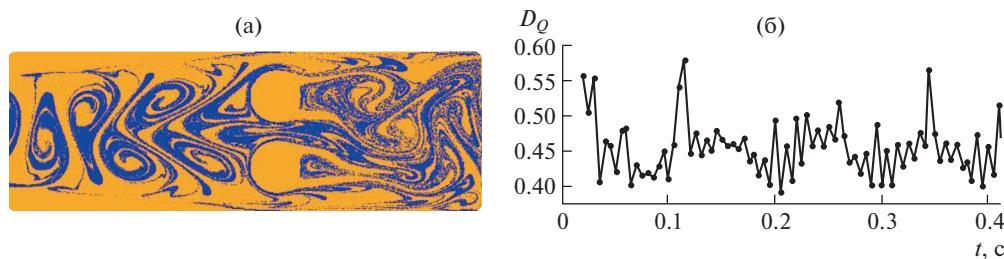


Рис. 35. Картина перемешивания (а) и динамика критерия перемешивания (б) в плоском проточном тракте.

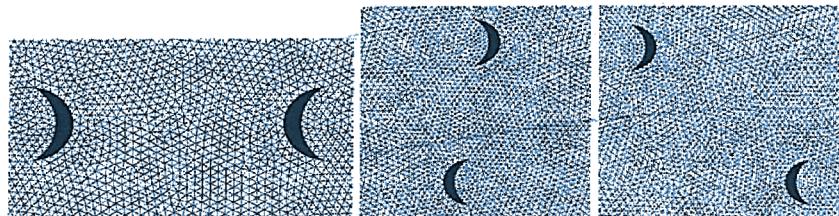


Рис. 36. Различные варианты расположения колеблющихся лопаток.

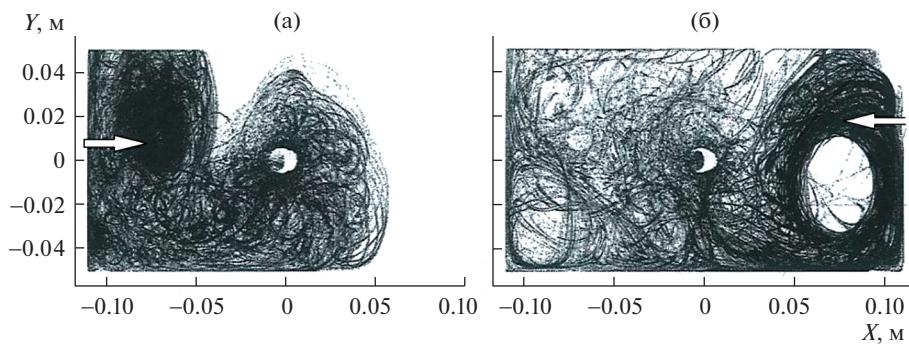


Рис. 37. Траектории всех частиц внутри области: (а) вариант с одной лопаткой; (б) вариант с двумя лопатками.

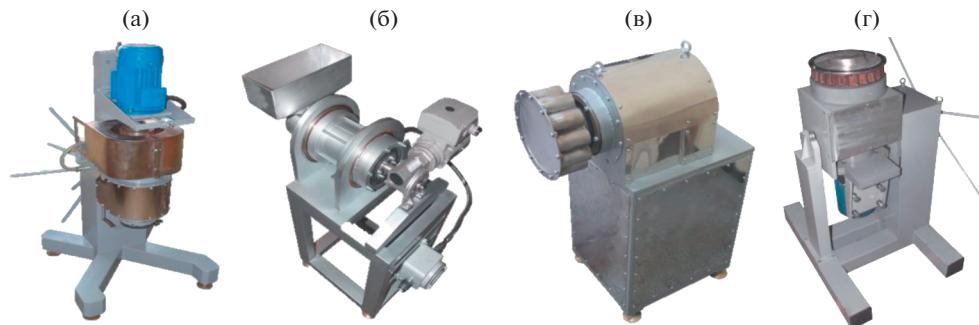


Рис. 38. Волновые машины и аппараты электромеханического принципа действия. Типовые элементы (узлы) волновых машин: (а) установка для волновой обработки вязких и высоковязких сред в порционном режиме; (б) волновой дозатор сыпучих материалов; (в) установка для волновой обработки жидких и сыпучих сред; (г) роторно-волновой измельчитель сыпучих материалов.

шумность и производительность. Измельчение и смешение твердых частиц в турбулентном потоке (эффект самоизмельчения, высокая чистота материала; 3) интенсивное смешение, тонкое диспергирование (от мкм до нм) и активация жидкостей (вязких и высоковязких). Уменьшение вязкости высоковязких сред. Эти процессы протекают при малых энергозатратах, например, на перемешивание 1 л маловязкой среды затрачивается порядка 0.2 Вт·ч энергии; 4) измельчение (тонкое и сверхтонкое), диспергирование, активация порошков и сухих смесей с целью получения уникальных материалов с высоким КПД; 5) фильтрация и пропитка пористых сред (многократная их интенсификация в 10–1000 раз). Волноводное распространение высокочастотных колебаний на большие расстояния с малым затуханием. Повышение нефте- и газоконденсатоотдачи пластов; 6) волновые силы в сжимаемой жидкости в 10–10² раз превышают силы радиационного давления (при традиционном ультразвуковом воздействии, ставшими классическими) – для двух режимов: а) режим присоединенной массы $\frac{a^2\omega}{v} \gg 1$; б) вязкий режим $\frac{a^2\omega}{v} \ll 1$; 7) эффекты волновой механохимии – меха-ноактивация, измельчение (реализация эффекта Ребиндера с высоким КПД), уменьшение вязкости в сочетании с ПАВ, изменение pH и др., ускорение каталитических процессов, волны – как катализаторы, получение тонкодисперсных (мкм и нм) материалов с заданными размерами (сульфат бария, монтмориллонит – органоглина-глинистые растворы и т.п.); 8) получение материалов с уникальными свойствами, композитов и нанокомпозитов (перемешивание углеродных нанотрубок в вязкой матрице в 10³ раз эффективнее по сравнению с ультразвуком).

Эти процессы являются научным базисом для создания управляемых волновых машин, реализующих высокие технологии в различных отраслях промышленности – ВОЛНОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ. Они являются российским приоритетом.

Управляемые волновые машины и аппараты, реализующие прорывные технологии в различных отраслях промышленности. В основу конструкции заложен принцип сочетания электродинамического принципа возбуждения колебаний с резонансом всей системы (совместно с механической частью). Механическая часть может быть выполнена самыми различными способами (рис. 38).

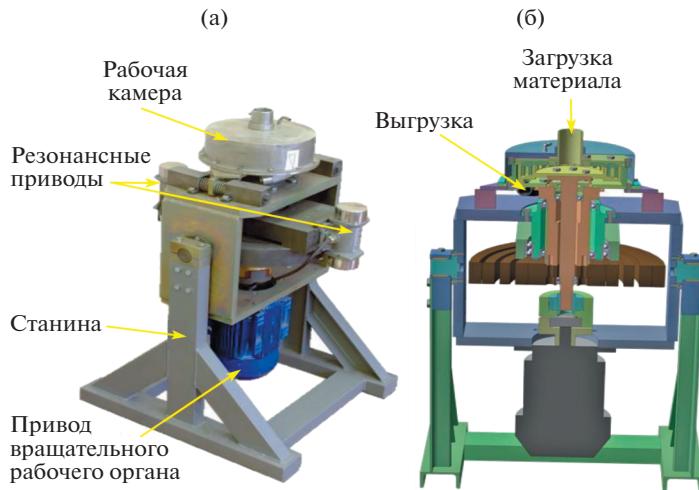


Рис. 39. Волновой дезинтегратор: (а) общий вид; (б) схема конструкции.

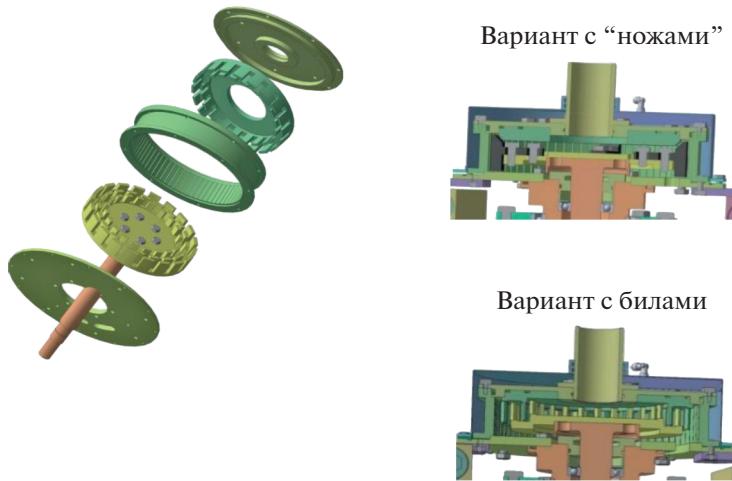


Рис. 40. Схема конструкции рабочей камеры и варианты рабочих элементов.

Волновые резонансные машины и волновые дезинтеграторы (типовые узлы волновых машин, рис. 39, 40)

Автоматизированные технологические линии (рис. 41, 42)

Управляемые кавитационно-волновые машины и технологические линии (рис. 43)

Волновая технология в нефтяной и газовой промышленностях [3, 4, 10, 11, 22, 25].

Волновые технологии (в нефтяной промышленности по добыче и бурению) имеют длительную историю, они были ранее использованы на месторождениях Западной Сибири с высоким экономическим эффектом. В последнее время получено существенное развитие этих технологий с широким внедрением в практику.



Рис. 41. Автоматизированная линия волновой обработки многофазных сред (маловязких и средневязких).



Рис. 42. Автоматизированная линия волновой обработки сыпучих материалов.



Рис. 43. Технологические линии для кавитационно-волновой обработки жидкых сред (тонкое и сверхтонкое измельчение, смешение и диспергирование супензий и эмульсий).

Ранее сотрудниками Научного центра ИМАШ РАН были выполнены эксперименты на многих нефтяных скважинах западных компаний “Бритиш петролеум”, “Шелл” и др.

Волновые технологии получили также широкое распространение во многих нефтяных компаниях в Западной Сибири, “Татнефть”, “Башнефть” и др.

В настоящее время они получили принципиально новое направление развития своих научно-технических основ. Об этом подробно написано в монографиях и статьях авторов.

Поэтому ниже представлены только некоторые конкретные результаты (фрагменты), дающие представление об их возможностях в нефтяной промышленности.

Интенсификация процесса бурения (рис. 44, 45)

Таким образом, при волновом бурении дебит увеличивается до трех раз.

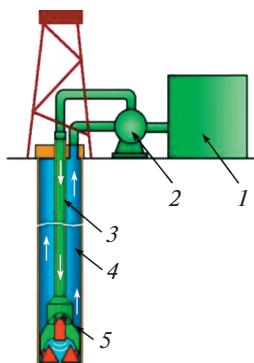


Рис. 44. Схема обработки. 1 – буровой раствор; 2 – насосный агрегат; 3 – колонна бурильных труб; 4 – буровое долото; 5 – генератор.

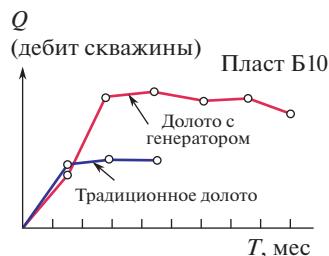
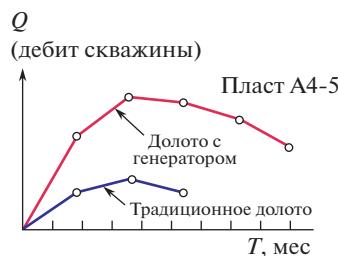


Рис. 45. Результаты волнового процесса бурения и проводки скважин.

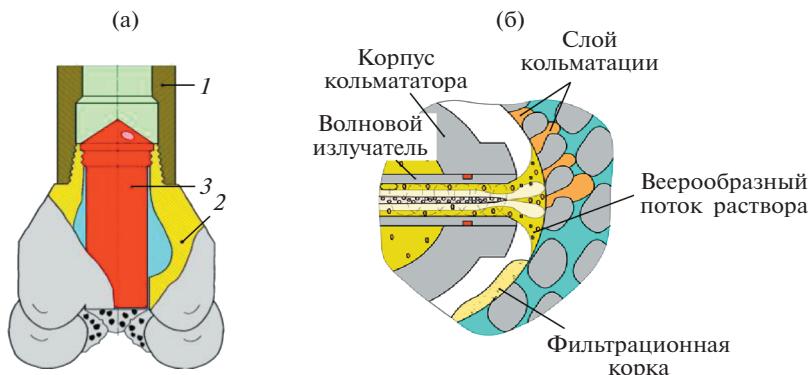


Рис. 46. (а) – Конструкция волнового долота-кольмататора: 1 – насосно-компрессорная труба; 2 – буровое долото; 3 – волновой генератор; (б) – схема процесса волновой кольматации.

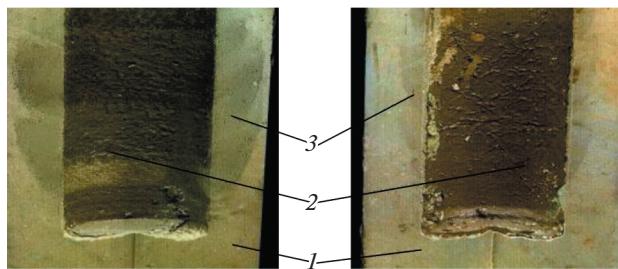


Рис. 47. Фотографии среза породы после традиционного бурения (слева) и волнового бурения с кольматацией (справа): 1 – образцы породы, 2 – пробуренные отверстия, 3 – зоны проникновения бурового раствора.

Кольматация при бурении (рис. 46, 47)

При волновом бурении (при кольматации) зона проникновения бурового раствора практически отсутствует и повышается дебит скважины.

Волновая технология обработки призабойных зон (рис. 48, 49)

Здесь представлены типовые результаты, которые получены ранее на сотнях скважин Западной Сибири. В последнее время на новой научно-технической основе ве-

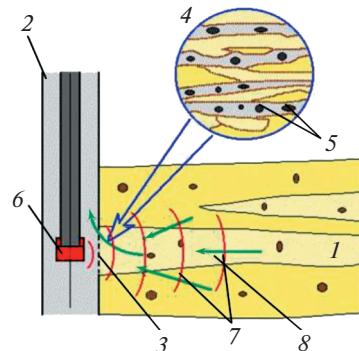


Рис. 48. Схема обработки призабойных зон: 1 – продуктивный пласт; 2 – добывающая скважина; 3 – интервал перфорации; 4 – призабойная зона пласта; 5 – загрязнение призабойной зоны; 6 – волновой генератор; 7 – волны излучения; 8 – вынос загрязнений из пласта.

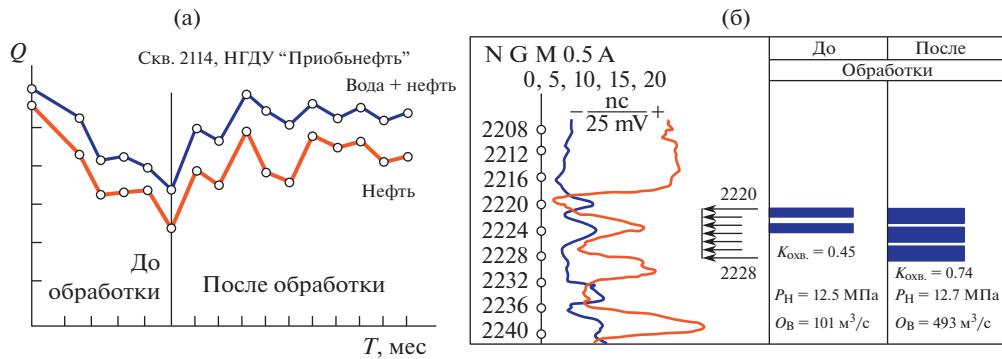


Рис. 49. Результаты промышленных испытаний технологии (а); изменение профиля приемистости и коэффициента охвата ствола (б).

дутся работы по увеличению как дебита скважины, так и по повышению нефтеотдачи пластов в истощенных месторождениях. Эти результаты являются российским приоритетом и опережают западные технологии.

Очистка фильтров в горизонтальных нефтяных скважинах (рис. 50, 51)

Работа выполнялась по контракту с компанией "Шелл".

Волновая обработка существенно эффективнее традиционного общепринятого процесса очистки. Работы выполнялись с использованием реальных фильтров и по технологии, представленной компанией "Шелл".

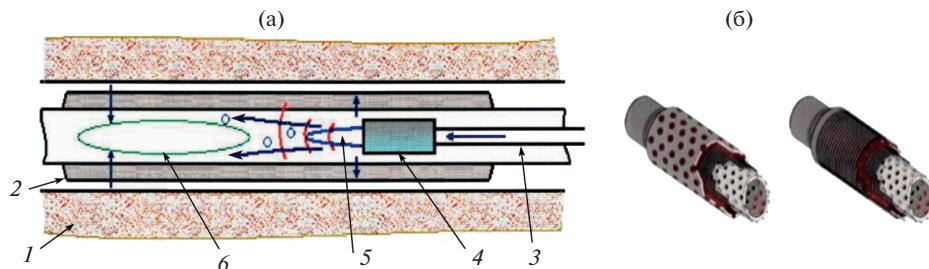


Рис. 50. Механизм очистки (а): 1 – нефтеносный пласт, 2 – coiled-tube, 3 – кавитационная каверна, 4 – фильтр, 5 – генератор, 6 – зона депрессии; общий вид фильтров (б).

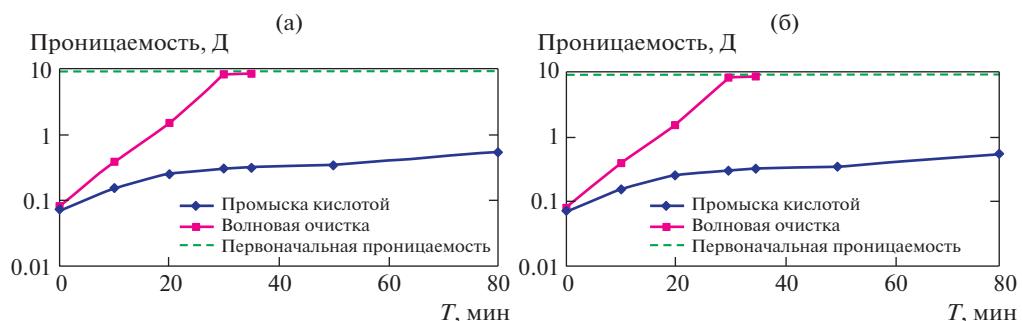


Рис. 51. Результаты экспериментов (промывочная жидкость – вода): (а) фильтр с gravel pack; (б) фильтр из металлических мембран (stratapack).



Рис. 52. Схема управляемой волновой обработки скважин.

Типовая система для мониторинга волновой обработки скважин управляемыми волновыми генераторами (рис. 52). Полученные в ходе волновой обработки данные передаются в единый диспетчерский пункт сбора и анализа данных со всех скважин месторождения (компьютерная система). Это только один из типовых простейших вариантов.

Разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для оценки эластичности магистральных кровеносных сосудов и анализа пульсовых волн на новых принципах нелинейной волновой механики [15, 16]. Нелинейная волновая биомеханика сердечно-сосудистой системы человека.

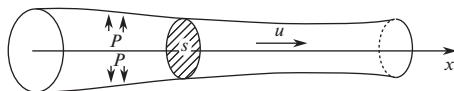
- Разработана математическая модель сердечно-сосудистой системы человека с учетом нелинейной волновой биомеханики (рис. 53).
- Разработан аппаратно-программный комплекс для исследований формы и скорости распространения пульсовой волны в магистральных кровеносных артериях (рис. 54).

Разработана математическая модель кровеносной системы человека, позволяющая производить расчеты пульсовой волны с учетом влияния различных индивидуальных факторов пациента (длины и диаметры аорты и основных сосудов, жесткости стенок аорты, конусности сосудов, вязкости крови и др.).

Аппаратно-программный комплекс для анализа пульсовых волн. В ИМАШ РАН создана уникальная аппаратура, позволяющая экспресс-методом (за 3–5 минут) провести обследование сердечно-сосудистой системы человека, определить гидродинами-

Система уравнений волновой динамики

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + (s \frac{\partial p}{\partial s}) \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad s = s(p)$$



➤ Моделирование аортального дерева на основе обобщенной модели, включающей восходящую аорту, правые подключичную и плечевую артерии, дугу аорты, левые подключичную и плечевую артерии, грудной и брюшной отделы аорты.

➤ Моделирование волновых процессов на основе полномасштабной модели артериального дерева, включающей 55 крупных кровеносных сосудов.

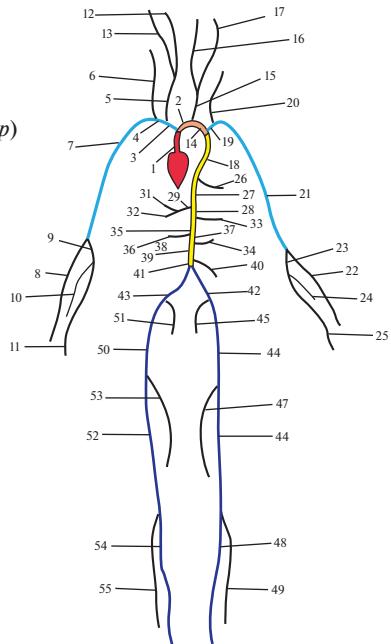


Рис. 53. Компьютерное моделирование волновых процессов в системе крупных артерий на основе нелинейной волновой биомеханики.



Рис. 54. Общий вид аппаратно-программного комплекса для анализа пульсовых волн в сосудах.

ческую картину ее работы, проверить эластичность магистральных сосудов и получить другие характеристики.

Аппаратура с помощью специальной программы позволяет осуществить синтез пульсовой волны и измерение кровяного давления не только в периферийных сосудах, но и в аорте.

Электронный модуль АПК включает в себя: волоконно-оптический датчик нового типа с высокой чувствительностью и разрешением; многоканальный электронный блок; прямое измерение скорости пульсовой волны; современный математический

аппарат волнового анализа; моделирование действия фармацевтических препаратов; обучение персонала.

Аппаратура содержит преимущественно отечественные комплектующие, по предварительным оценкам, ее стоимость при серийном изготовлении будет существенно ниже зарубежных аналогов. Основные технические решения, использованные при создании аппаратуры, запатентованы.

Разработанная диагностическая аппаратура может быть рекомендована к использованию в медицинских клиниках, в том числе удаленных от центров медицинских учреждениях, воинских частях и др.

Обобщенные направления разработок в отраслях техники – волновая технология и волновое машиностроение. Здесь упомянуты только те направления и названия технологий, по которым имелись постановки задач, определенные решения и результаты с различной степенью их разработки.

1. **Строительство и волновая механоактивация.** Повышение прочности строительных материалов и текучести строительных растворов. Получение ячеистых материалов, эмульсий и супензий, получение высококачественных лаков и красок. Измельчение, динамика частиц и активация. Смешение.

2. **Материаловедение. Тонкое измельчение и перемешивание.** Получение материалов с уникальными свойствами. Сухие смеси. Композиты. Нанокомпозиты, пропитка, и высокопрочные композиционные материалы, клеевые композиции.

3. **Пищевая промышленность.** Гомогенизаторы и смесители молочных продуктов. Хлебопекарная отрасль. Волновые аппараты.

4. **Трубопроводный транспорт. Стабилизация, гашение гидроударов, вибраций, пульсаций, шума в трубопроводных системах.** Бесшумность и уменьшение гидравлического сопротивления (повышение производительности) трубопроводных систем. Транспорт сверхвязкой нефти (СВН).

5. **Химическая технология. Экология.** Очистка жидкостей. Смешение и диспергирование жидкостей и газов. Нефтепереработка и нефтехимия, в том числе, получение высококачественных моторных масел с присадками, обессоливание, повышение эффективности катализитических и тепломассообменных процессов и т.п.

6. **Энергетика.** Экономичные смешанные виды топлив. Ликвидация отложений в теплообменниках. Установление механизмов неустойчивости ГЭС (в том числе Саяно-Шушенской ГЭС) и рекомендации по обеспечению их безопасности.

7. **Военно-промышленный комплекс и авиационно-космическая отрасль.** Повышение надежности, безаварийности авиационно-космической техники, обеспечение бесшумности плавающих аппаратов [26]; получение композитных корпусов для авиационно-космической и ракетной техники. Создание установок для производства изделий спецхимии (технологические линии).

8. **Машиностроение. Волновое машиностроение. Разработка машин и аппаратов на волновых принципах и технологических линий, реализующих прорывные технологии.** Снижение шума и вибраций в машинах. Диагностика. Моющие машины, очистка деталей от масел и окалины, покрытие и пропитка поверхностей, получение высокопрочных материалов и т.п. Получение качественных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и высококачественных масел с присадками. Высокопрочные полимербетоны для станин прецизионных станков. Закалка изделий.

9. **Мембранные технологии. Разделение многофазных несмешивающихся жидкостей.** Отделение воды от масел и газа и воды от нефти и т.п.

10. **Нефтегазодобыча, нефтепереработка и нефтехимия.** Интенсификация процессов бурения и добычи, приготовление буровых растворов, повышение нефтегазоконденсатоотдачи пластов. Транспортировка СВН. Повышение глубины нефтепереработки (тяжелых остатков).

11. **Медицинская техника. Фармацевтика.** Разработка диагностической аппаратуры в кардиологии, физиотерапии и медицинской техники в других областях медицины.

12. **Перспективы в сельском хозяйстве:** волновая техника и технология для глубокой переработки зерна, получения модифицированных крахмалов, добавок к комбикормам, удобрений, молочных продуктов и т.п. Разработка волновых аппаратов.

Разработки, по упомянутым выше направлениям, продолжаются в настоящее время как в научном, так и в прикладном плане совместно с различными организациями и компаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е. М.: Институт компьютерных исследований. Научно-изд. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. С. 780.
2. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Научно-изд. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2013. С. 582.
3. Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышение нефтеотдачи. Наука и практика. Ижевск: Издательство “ИКИ”, 2014. С. 256.
4. Ganiev O.R., Ganiev R.F., Ukrainsky L.E. Enhanced oil recovery. Resonance macro and micro-mechanics of petroleum reservoirs. Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing, 2017. Р. 240.
5. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии. М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. С. 192.
6. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. Изд. 2-е. М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2012. С. 92.
7. Ganiev R.F., Ukrainski L.E. Nonlinear Wave Mechanics And Oscillatory Phenomena on the Basis of High Technologies. USA, Begell house, 2012. Р. 527.
8. Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Pustovgar A.P. Wave Technology in Mechanical Engineering: Industrial Applications of Wave and Oscillation Phenomena. Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing, 2015. Р. 176.
9. Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. Волновая технология приготовления альтернативных видов топлив и эффективность их сжигания. Москва, 2008. С. 116.
10. Ganiev R.F. On the current state and the future prospects of the Institute of Machine Science, Russian Academy of Sciences, and problems of the mechanics of machines and breakthrough technologies // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2014. V. 43. № 3. Р. 188.
11. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Андреев В.Е., Котенев Ю.А. Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности. Санкт-Петербург: Недра, 2008. С. 185.
12. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в установках колебательного типа // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 5.
13. Aldoshin S.M., Badamshina E.R., Grishchuk A.A., Tarasov A.E., Estrin Y.I., Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Kurmenev D.V., Pustovgar A.P. Study of the influence of single-wall carbon nanotube dispersion techniques upon the properties of epoxy resin-based nanocomposites. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. V. 44. № 3. Р. 271.
14. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Кислогубова О.Н., Курменев Д.В., Пустовгар А.П., Алдошин С.М., Бадамшина Э.Р. Перспективы волновых технологий для создания новых полимерных композиционных материалов (нанокомпозитов, высоконаполненных композитов) // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 4 (217). С. 3.
15. Ганиев Р., Ильгамов М.А. Кавитация столба жидкости при движении ее нижней границы. Доклады Академии наук. 2018. Т. 482. № 1. С. 28.
16. Ganiev R.F., Reviznikov D.L., Rogoza A.N., Slastushenskii Y.V., Ukrainskii L.E. Analysis and diagnostics of the human cardiovascular system using the principles of nonlinear wave mechanics. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. V. 45. № 2. Р. 178.

-
17. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Рогоза А., Сластушенский Ю.В., Украинский Л.Е. Волновые процессы в сердечно-сосудистой системе человека: измерительный комплекс, вычислительные модели и диагностический анализ. Доклады Академии наук, 2017. Т. 473. № 3. С. 291.
 18. Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А., Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М. Пространственные колебания трубопровода с упруго-смещающейся опорой при действии внутреннего ударного давления // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 3.
 19. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Оптимизация пространственного расположения рабочих элементов в установках колебательного типа // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 3.
 20. Сайфуллин И.Ш., Панин С.С., Ганиев Р.Ф., Ганиев О.Р. О перспективах разработки и использования нелинейных волновых технологий для переработки энергетических конденсированных систем // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 96.
 21. Ганиев Р.Ф., Аганин А.А., Ганиев О.Р., Гранова Г.Н., Давлетшин А.И., Украинский Л.Е., Устенко И.Г. Сжатие кавитационного пузырька в вязкой жидкости // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 3.
 22. Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Устенко И.Г. Воздействие волн на пористые среды и повышение нефтеотдачи пластов // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 82.
 23. Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Устенко И.Г. Основы волноводной механики продуктивных пластов. Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 3. С. 298.
 24. Ганиев Р.Ф., Касилов В.П., Кислогубова О.Н., Пустовгар А.П., Курменев Д.В. Получение тонких эмульсий контролируемого уровня дисперсности волновыми методами // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 2. С. 63.
 25. Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Гранова Г.Н., Украинский Л.Е., Устенко И.Г. Увеличение фильтрационной способности призабойной зоны пласта с помощью волнового воздействия для интенсификации добычи нефти // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 88.
 26. Ganiev R.F., Balakshin O.B., Kukharenko B.G. Turbulence of flow and flutter of the rotor blades in an axial turbocharger. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. V. 44. № 6. P. 485.