

динамічних навантажень // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – Київ, 2000. – Вип. 3. – С. 34–39.

6. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. // Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

7. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.

8. Лучко И. А., Плаксий И. А., Ремез Н. С. и др. Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И. А. Лучко. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.

УДК 539.4.011.25.019.3: 621.314.26

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СВЯЗИ СРЕДЫ

*О. М. Терентьев, канд. техн. наук (НТУУ "КПИ")*

*Розглянуто методика визначення частоти власних коливань, часу релаксації та вимушеної частоти коливань міжмолекулярних зв'язків нафтових сумішей. Трансформація частоти зовнішнього джерела енергії до субрезонансного діапазону забезпечує руйнування зв'язків між молекулами середовища зі зниженою енергоємністю та підвищеним коефіцієнтом корисної дії.*

Снижение энергоёмкости и повышение КПД процесса разрушения достигается за счет физического воздействия на электромагнитные связи внешней среды управляемыми электромагнитными потоками [1]. Такое воздействие основано на нагружении разрушаемой среды импульсно-волновыми колебаниями частотой, равной или близкой к собственным частотам молекулярных связей среды. В результате резонансных явлений происходит разрыв электромагнитных связей среды. Расчет собственных колебаний среды проведен на основе анализа энергетического баланса системы внешний источник–среда с учетом взаимодействия ближайших молекул с разными массами (рис. 1).

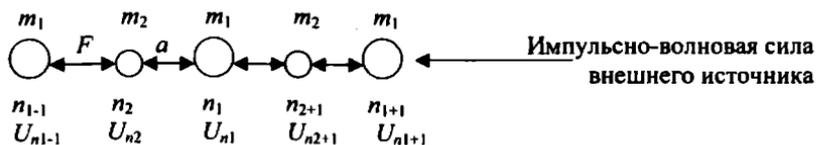


Рис. 1. Цепочка, состоящая из чередующихся молекул:  $a$  – среднее расстояние между молекулами;  $U_n$  – амплитуда колебаний;  $m$  – масса молекулы;  $F = md^2x/dr^2$  – сила, действующая между молекулами, кратна мгновенному значению расстояния между ними

Уравнение движения для молекул массой  $m_1$  и  $m_2$ :

$$\begin{cases} -m_1 \ddot{U}_{n1} = (U_{n2+1} - U_{n1} + U_{n2} - U_{n1})\beta = (U_{n2+1} + U_{n2} - 2U_{n1})\beta, \\ -m_2 \ddot{U}_{n2} = (U_{n1-1} + U_{n1} - 2U_{n2})\beta, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент жесткости связи между молекулами.

Решение этой системы ищем в виде:

$$\begin{cases} U_{n1} = A_1 e^{i(ka_n - \omega t)} \\ U_{n2} = A_2 e^{i(ka_n - \omega t)}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_1, A_2$  – постоянные коэффициенты,  $b = 2\pi/\lambda$  – волновой вектор,  $\omega$  – собственная частота колебаний молекулы.

После известных математических выкладок определены:

$$\omega_0^2 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} 2\beta; \quad (3)$$

$$\gamma^2 = \frac{4\beta^2}{m_1 m_2}; \quad (4)$$

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\gamma^2}{\omega_0^4} \sin^2 \frac{ba}{2}} \right]. \quad (5)$$

Преобразовав выражение (5), получим

$$\omega^2 = \frac{\omega_0}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\gamma^2}{\omega_0^4} \sin^2 \frac{ba}{2}} \right] = \beta \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \sin^2 \frac{\pi a}{\lambda}} \right]. \quad (6)$$

Учитывая, что взаимодействие между соседними молекулами определено силами Кулона и гравитационного взаимодействия, можем записать:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{a^2} + G \frac{m_1 m_2}{a^2} = \beta x; \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{a^2} \left[ \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} + G m_1 m_2 \right]; \quad (8)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{a^2} \left[ \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} + G m_1 m_2 \right] \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \sin^2 \frac{\pi a}{\lambda}} \right], \quad (9)$$

где  $\epsilon$  – электрическая постоянная;  $q$  – заряд молекулы;  $G$  – гравитационная постоянная.

Слагаемым  $Gm_1m_2$  можно пренебречь ввиду его малости. Знак минус соответствует электромагнитному и гравитационному взаимодействию без учета слабого и сильного взаимодействия между элементами среды.

Рассмотрим в качестве подсистемы «Среда» жидкие среды, например нефть. В нефти заметную роль играют связи  $-C-H$ ,  $\cdot\cdot S-C-$ ,  $-O-C-$  и связь  $-N-C-$ , которые надо разорвать. Найдем для каждой из них собственные колебания. Для их нахождения необходимо знать заряд элементов, которые составляют эту связь, их массу, гравитационную постоянную  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ , электрическую постоянную  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  и среднюю длину связи  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}$  [2–4]. Заряд элементов, составляющих связь, определяется как произведение порядкового номера элемента в таблице Менделеева на заряд электрона  $e = 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . Масса элемента равна атомному весу химического элемента, умноженному на атомную единицу массы  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  [4]:

$$\begin{aligned} q_C &= 6 \cdot 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, & m_C &= 12,011 \cdot 1,660551 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_H &= 1 \cdot 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, & m_H &= 1,008 \cdot 1,660551 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_S &= 16 \cdot 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, & m_S &= 32,066 \cdot 1,660551 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_O &= 8 \cdot 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, & m_O &= 15,9994 \cdot 1,660551 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_N &= 7 \cdot 1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, & m_N &= 14,00674 \cdot 1,660551 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \end{aligned}$$

Подставив в выражение (9) численные значения, определим собственные частоты основных типов межмолекулярных связей. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные частоты колебаний разных типов межмолекулярных связей нефти

Тип связи	$A = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0}$	$C = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$	$D = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}$	$E = \sin^2 \frac{\pi\alpha}{\lambda}$	$\lambda = \frac{h}{(m_1 + m_2)c}$ , м	Собственная частота $\omega$ , Гц
C-H	$1,36 \cdot 10^{-27}$	$6,476 \cdot 10^{26}$	0,286	0,906	$2,151 \cdot 10^{-11}$	$5,519 \cdot 10^{12}$
C-O	$1,11 \cdot 10^{-26}$	$8,778 \cdot 10^{25}$	0,980	0,053	$9,995 \cdot 10^{-12}$	$2,488 \cdot 10^{12}$
C-N	$9,69 \cdot 10^{-27}$	$9,313 \cdot 10^{25}$	0,994	0,695	$1,076 \cdot 10^{-11}$	$9,891 \cdot 10^{12}$
C-S	$2,22 \cdot 10^{-26}$	$6,892 \cdot 10^{25}$	0,793	0,112	$6,352 \cdot 10^{-12}$	$4,118 \cdot 10^{12}$
H-S	$3,69 \cdot 10^{-27}$	$6,162 \cdot 10^{26}$	0,118	0,0013	$8,456 \cdot 10^{-12}$	$2,044 \cdot 10^{11}$

В равновесном состоянии взаимодействие между элементами системы внешний источник–среда определяется состоянием молекулярных связей среды. Молекулы системы колеблются в области равновесного состояния. Взаимодействие молекул между собой зависит от состояния связей между ними. Молекулярные связи также совершают колебательное движение в соответствии с уравнением

$$f(x) = e^{-\delta} A_0 \frac{\omega_1^2}{(\omega - \omega_1)^2} \frac{(t - t_1)^2}{t^2}, \quad (10)$$

где  $A_0 = 9,5 \cdot 10^{-8}$  – начальная амплитуда колебания межмолекулярной связи, м [5];  $\delta$  – коэффициент затухания;  $\omega_1$  и  $\omega$  – собственная частота колебания молекулярной связи среды и частота гармоники осциллятора, возбуждаемого внешним источником колебаний;  $t_1$  и  $t$  – время релаксации колебаний молекулярной связи как осциллятора среды и колебаний, возбуждаемых внешним источником.

При каждом цикле колебания часть энергии рассеивается, превращаясь в тепло. Потери энергии обусловлены местными пластическими деформациями на границах взаимодействия структурных элементов обрабатываемой среды. Характер затухания свободных колебаний  $\psi$  определяется отношением энергии, рассеиваемой за один цикл, к полной энергии колебаний. Амплитуда колебаний снижается при рассеянии энергии в системе. Экспериментально доказано [3], что после каждого цикла амплитуда колебаний уменьшается в отношении:

$$\frac{e^{-nT}}{e^{-n(t-T)}} = e^{-nT} = e^{-\delta}. \quad (11)$$

Размахи последовательных колебаний составляют геометрическую прогрессию. Натуральный логарифм отношения двух амплитуд, следующих друг за другом через период, обозначен через  $\lambda = \ln e^{-nT} = nT = \delta$  и назван логарифмическим декрементом затухания [5]. С его помощью характеризуют потери на внутреннее трение, гистерезисные и другие потери. При нагружении внешним источником материальной среды ее отдельные элементы испытывают различные виды нагрузок. Поскольку удельная потенциальная энергия деформации при сдвиге слоев среды пропорциональна квадрату напряжения [6], то относительное внутреннее сопротивление среды, определяющее логарифмический декремент затухания, возрастает пропорционально максимальному касательному напряжению также в квадрате:

$$\delta = \psi \tau_{\max}^2 = 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot 26,36^2 = 4,81, \quad (12)$$

где  $\psi = 6,92 \cdot 10^{-3}$  – отношение энергии, рассеиваемой за один цикл, к полной энергии колебаний для жидких органических сред [7];  $\tau_{\max} = 26,36$  – максимальное касательное напряжение обрабатываемой среды [8].

С помощью программного пакета MathCAD v7.0 Pro построен график функции резонансного воздействия на межмолекулярные связи обрабатываемой среды в соответствии с (10) (рис. 2).

Колебательную систему внешний источник–среда можно представить в виде суперпозиции бесконечного количества гармонических осцилляторов с различными частотами. Математически это можно описать, разложив выражение (10) в ряд Фурье.

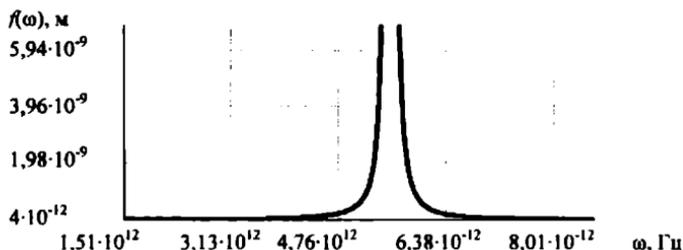


Рис. 2. Резонансная кривая соответствия собственной частоты колебаний молекулярных связей среды и частоты гармоники внешнего источника колебаний

Для реструктуризации молекулярной структуры среды рекомендуется выбирать такой внешний источник колебаний, частота которого стремится к частоте одной из рабочих гармоник, а амплитуда колебаний источника стремится к амплитуде этой гармоники. В настоящее время промышленность еще не освоила выпуск генераторов с частотным диапазоном в сотни ГГц. Поэтому необходимо использовать метод механической трансформации частоты. Суть метода заключается в том, что используется первичный внешний “низкочастотный” источник колебаний, например ультразвуковой частоты. Колебания первичного “низкочастотного” источника с ультразвуковой частотой передаются в обрабатываемую среду, трансформируются в “высокочастотные” колебания и возбуждают колебания вторичного внутреннего источника. Таким высокочастотным вторичным внутренним источником колебаний являются молекулы среды. Если рассматривать молекулы как мембраны, то их колебания могут достигать сверхвысоких частот. Эти частоты будут определяться временем релаксации внутренних мембранных осцилляторов.

Результаты расчета гармоник вторичного внутреннего “высокочастотного” осциллятора колебаний приведены в табл. 2.

Колебания молекул обеспечивают переменные нагрузки в межмолекулярных связях. Таким образом, обеспечивается механическая трансформация частоты, так как образована колебательная система с “низкочастотным” первичным внешним источником и вторичным высокочастотным внутренним источником колебаний. В соответствии с вышеизложенным методом механической трансформации частоты при воздействии внешнего источника электромагнитных колебаний на межмолекулярные связи обрабатываемой среды последние переходят в возбужденное состояние. Длительность пребывания системы в возбужденном состоянии определяется временем релаксации. Время релаксации различных типов межмолекулярных связей принято по источнику [7].

Таблица 2. Расчетные параметры колебаний внешнего источника

Тип связи	Собственная частота колебания $\omega \cdot 10^{12}$ , Гц	Номер гармоники	Время релаксации внутреннего осциллятора $\tau \cdot 10^{-12}$ , с	Вынужденная частота колебаний вторичного источника $\omega \cdot 10^{12}$ , Гц
C-H	5,519	1	0,57	5,508
		7	4,41	4,481
		20	11,31	5,551
C-O	2,488	1	1,259	2,495
		7	8,891	2,473
		20	25,178	2,469
C-N	9,891	1	3,178	9,885
		7	2,229	9,866
		20	6,396	9,865
C-S	4,118	1	0,759	4,135
		7	5,359	4,104
		20	15,691	4,005
H-S	20,44	1	1,525	20,611
		7	1,067	20,614
		20	30,067	20,492

Если энергии внешнего источника достаточно для приведения колебательной системы в резонансный режим, то обеспечиваются разрыв той межмолекулярной связи, собственная частота которой совпадает или приближается к одной из гармоник колебаний внешнего источника.

1. Пат. 2679153 Франция. МПК C10G. Способ разрушения материала с заданными свойствами и устройство для его осуществления / Джулис М.
2. Тонг Кин Н. Теория механических колебаний: – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1963. – 245 с.
3. Блейкмор Дж. Физика твердого тела: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 324 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики: – М.: Наука, 1977. – 232 с.
5. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1980. – 187 с.
6. Коттрелл Т. Прочность химических связей. – М: Иностранная литература, 1956. – 282 с.
7. Быков Г. В. Электронные заряды связей в органических соединениях. – М: Издательство Академии наук, 1960. – 136 с.
8. Игнатьев И. С., Тенишева Т. Ф. Колебательные спектры и электронное строение молекул. – Л: Наука, 1991. – 152 с.