

Способность к кавитации принято характеризовать числом кавитации:

$$Q = \frac{P_0 - P}{\frac{1}{2}\rho u^2}, \quad (1)$$

где  $P_0$  — начальное давление в жидкости,  $P$  — давление, при котором газ полностью растворен (для гомогенной жидкости — давление парообразования),  $u$  — скорость потока,  $\rho$  — плотность флюида.

При некотором начальном давлении  $P_0$  поток представляет однофазный флюид — газ полностью растворен. Снижение давления ниже критического уровня (или соответствующее увеличение скорости потока) приводит к образованию первичных пузырьков газа. Если затем давление вновь возрастает, причем раньше, чем газовые пузырьки объединятся в сплошную фазу, произойдет схлопывание пузырьков. Критическое значение числа кавитации  $Q^*$  обычно лежит в диапазоне значений  $0,35 < Q^* < 1,0$ .

При схлопывании поверхность пузырька стягивается к центру со скоростью, нарастающей по степенному закону. Первоначальная потенциальная энергия пузырька переходит в кинетическую и выделяется в очень небольшом объеме, практически в точке схождения. Вследствие этого плотность энергии (давление) в этой области многократно возрастает по сравнению с первоначальной. Теоретически это явление рассматривается как сферически сходящаяся к центру ударная волна.

В технике кавитация известна как вредное явление, служащее причиной разъедания и разрушения лопастей гребных винтов, турбин, деталей насосов и трубопроводов. Кавитационной коррозии подвергаются материалы со статическим пределом текучести  $10^4 - 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, причем работающие в жидкости, находящейся под давлением 1 атм. При начальном давлении в жидкости порядка 10 000 атм на фронте сходящейся ударной волны при схлопывании пузырьков может быть достигнуто давление свыше 1000 кбар.

Одновременно как результат процесса адиабатического сжатия происходит нарастание температуры. Абсолютная температура  $T$  на фронте сферически сходящейся ударной волны удовлетворяет уравнению [3]:

$$\frac{T_0}{T} = \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma-3}, \quad (2)$$

где  $R_0$  и  $R$  — начальный и текущий радиусы пузырька;  $T_0$  — температура среды,  $\gamma$  — показатель адиабаты, приблизительно равный 1,4.

При начальной температуре  $T_0 \approx 1000^\circ\text{C}$  быстро сжимаемое вещество газонаполненного пузырька может быть нагрето до температуры в несколько тысяч градусов.

Таким образом, при соответствующих исходных параметрах процесса механизм кавитации позволяет достичь в области сжатия давлений и температур, удовлетворяющих  $P$ — $T$ -условиям синтеза алмазов. Принципиально важно здесь, что при этом сам расплав остается в условиях умеренных температур и давлений. Это позволяет разрешить одну из наиболее существенных трудностей, которая возникает при рассмотрении проблемы происхождения алмазов. Так как теоретические и экспериментальные данные указывают, что кристаллизация алмаза осуществляется в условиях высоких давлений ( $P > 50$  кбар) и температур ( $T > 1500^\circ\text{C}$ ), геологи, естественно, обращались к таким моделям кимберлитового процесса, которые бы обеспечили развитие необходимых условий в магматическом расплаве. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что в природе отсутствует подходящий механизм для достижения давлений свыше 50 кбар. Но самое главное, из анализа минералогических равновесий следует, что породы, в том числе кимберлиты, вообще не испытывали давлений свыше 20—25 кбар [12]. Таким образом, необходимо было объяс-

нить, как кристаллы алмаза оказались вкрапленными в породу, которая сама не несет следов нагрузок, необходимых для синтеза алмазов.

Кавитационный механизм не только разрешает эту проблему в принципе, но принимая во внимание реальные геологические условия синтеза алмазов, позволяет указать некоторые конкретные параметры этого процесса.

Энергия, выделяющаяся при схлопывании сферического пузырька, пропорциональна начальному давлению [18]:

$$E = \frac{P_0 4\pi R_0^3}{3}. \quad (3)$$

Показателем начального давления является давление кристаллизации наиболее барофильных минералов-спутников алмаза, прежде всего пирропа. Так как пирроп кристаллизуется при давлении  $\sim 20$  кбар, начальное давление должно быть больше 20 кбар. Эту величину следует рассматривать как минимальное значение  $P_0$ , при котором энергия ударной волны становится достаточной для кристаллизации алмаза.

Скорость движения расплава, отвечающая режиму начальной кавитации, определяется из выражения (1) для числа кавитации. Принимая  $Q^* = 0,5$  и учитывая  $P_0 \sim 20$  кбар и  $P = 11$  кбар, находим, что скорость потока  $u \simeq 1200$  м/сек.

Температурные условия в расплаве имеют оптимальные пределы. После схлопывания пузырька происходит рассеяние ударной волны, сопровождающееся быстрым падением давления в точках кавитации. Если после снятия давления кристалл окажется в расплаве с высокой температурой, решетка алмаза перестроится в графит. Чтобы алмаз был закален в метастабильное состояние, температура среды не должна превышать  $1200^\circ\text{C}$ , что отвечает верхней границе устойчивости алмаза при низких давлениях.

Нижний температурный предел лимитируется вязкостью магмы. Задачу о схлопывании сферической полости с учетом вязкости жидкости исследовал Е. И. Забабахин [17]. Динамика процесса в этом случае зависит от величины числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{R_0}{\nu} \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}, \quad (4)$$

где  $\nu = \eta/\rho$  — кинематическая вязкость. Вязкость препятствует ускорению жидкости. При некоторой величине  $Re < Re^*$ , где  $Re^*$  — критическое число, кумуляция энергии полностью устраняется вязкостью. Критическое значение числа Рейнольдса  $Re^* = 8,4$ . При  $T = 1000^\circ\text{C}$  оливинобазальтовый расплав имеет динамическую вязкость  $\eta$  порядка  $10^5$  пуаз [25] и  $\nu$  порядка  $2 \cdot 10^4$ . Принимая  $P_0 = 20$  кбар,  $\rho = 2,5$  г/см<sup>3</sup> и  $R_0 = 10$  см, получим  $Re \sim 50$ , значительно превосходящее критическую величину. Однако при  $T = 700^\circ\text{C}$  вязкость возрастает до такой степени, что для реально допустимых начальных радиусов числа Рейнольдса становятся ниже критических. Таким образом, оптимальная температура расплава, очевидно, близка к  $1000$ — $1100^\circ\text{C}$ . При этом давление в нем должно быть  $\sim 20$  кбар, а скорость движения магмы  $\sim 1200$  м/сек.

Еще раз подчеркнем, что сами по себе эти условия никоим образом не отвечают условиям синтеза алмаза. Но возникновение режима кавитации в таком расплаве приводит к образованию в отдельных точках сверхвысоких давлений и температур, обеспечивающих синтез алмаза в области его глубокой термодинамической устойчивости.

Можно показать, что с изложенных позиций находят естественное объяснение многие свойства природных алмазов и особенности их распределения в коренных месторождениях: значительные размеры и кристаллографическое совершенство природных алмазов; присутствие алмазов в породе, как правило, в виде единичных кристаллов, равномерно распре-