

К ВОПРОСУ ОБ АСПЕКТАХ ЗАБОЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО СНАРЯДА УДАРНОГО ТИПА

А.Н. Давиденко, А.А. Пащенко, А.А. Игнатов, Национальный горный университет, Украина

Освещены основные особенности конструктивных решений в снаряде гидромеханического бурения ударного типа. Показаны преимущества, области применения и решения геолога – технологических задач бурения скважин при использовании проектируемого снаряда. Обоснованы некоторые технологические аспекты механики разрушения горных пород при использовании рассматриваемого снаряда ударного типа.

Введение. Преобладающее большинство современных способов разрушения горных пород основано на механическом разделении некоторого объема твердой массы на элементы – частицы небольшого размера под действием локальных концентрированных напряжений, превышающих сопротивление сил внутренних связей. Разрушающие напряжения в этом случае могут создаваться под действием внешних сил, возникающих при внедрении в породу специальных инструментов, обладающих большей твердостью, чем сама порода. На забое скважины при воздействии породоразрушающего инструмента характер разрушения породы может быть объемный, поверхностный и усталостный [1].

За счет многократного силового воздействия инструмента в породе развивается система трещин, поэтому твердость ее снижается, и периодически на забое возникают условия для объемного разрушения. Большинство горных пород можно отнести к разряду микронеоднородных трещиноватых хрупких тел, разрушение которых начинается вблизи включений и трещин вследствие локальной концентрации напряжений. На практике значительные сдвиги и разрушения возникают вследствие развития поверхностей скольжения (т.е. трещин сдвига).

Если к свободной поверхности твердого тела, например, горной породе, приложить через жесткий пуансон (породоразрушающий инструмент) внешнюю механическую нагрузку, то при достаточной величине последней в теле начнут проявляться упругие, а затем остаточные деформации. Вместе с пуансоном по направлению его движения будет смещаться материал, находящийся в зоне контакта пуансона с твердым телом, а также некоторая часть материала, находящаяся за пределами контактной зоны [2].

В тоже время, анализ литературных источников и производственных данных говорит о том, что в современной практике строительства скважин ведутся довольно значительные научно-исследовательские работы по изысканию новых высокоэффективных способов бурения, позволяющих с одной стороны сократить затраты энергии и времени, а с другой повысить уровень реализуемой на забое мощности. В противовес вращательному механическому способу рассматриваются методы, использующие новейшие достижения различных фундаментальных и прикладных наук. Особое место в большой гамме новых способов занимает – гидромеханический, и в частности одна из его конструктивных интерпретаций, использующая энергию большого количества стальных или твердосплавных шаров, многократно соударяющихся с забоем скважины с большой скоростью [3]. Весьма заметная его эффективность, определяемая значительностью величины мощности, реализуемой на забое и довольно высокой продолжительностью рейса, которая ограничивается лишь износостойкостью струйного аппарата, предопределила его подверженность всесторонним конструкторским и технологическим усовершенствованиям, направленным на адаптацию рассматриваемого метода к различным горно-геологическим условиям.

Целью статьи является рассмотрение конструктивных особенностей модернизированных гидромеханических снарядов и формулирование на основе принципов теории физики разрушения горных пород основных технико-технологических мероприятий сооружения скважин, обеспечивающих существенное повышение производительности и экономичности буровых работ.

Основной материал. В ранних работах авторов были рассмотрены гидромеханические снаряды, содержащие в себе породоразрушающие органы в виде кольца или специальной пористой матрицы, при этом, основным, формирующим центральную часть забоя, является все же гидродинамический способ углубки. Принципиально отличным можно считать механизм обработки периферийной зоны забоя.

Вовлекаемые во вращение и абразивно-силовое взаимодействие шары и обломки горных пород и истирающих материалов совершают некоторую работу разрушения, аналитически обосновать которую можно следующим образом. Само исполнение кольца или пористой структуры матрицы и довольно неправильная форма, как обломков шаров, так и горной породы практически исключает их перекачивание по забою. В этом случае единственно осуществимым механизмом будет волочение частиц, а процесс разрушения сведется в конечном итоге к истиранию породы.

Несмотря на явные достоинства модернизированных снарядов вращательного действия им все же присущ недостаток – довольно низкая эффективность работы в крепких породах по обработке периферийной зоны забоя скважины и невозможность создания комбинированного механизма разрушения кольцом при существующей схеме бурения.

В связи с этим в основу следующей конструкции была поставлена задача усовершенствования устройства, в котором иное конструктивное исполнение схемы привода и механического породоразрушающего органа обеспечивает: расширение диапазона применения снаряда, даже в сверхкрепких породах, создание условий для осуществления производительного механизма формирования периферийной зоны забоя, а именно ударно-вращательного метода с применением породоразрушающих шариков.

Задача решена тем, что в известный шароструйный снаряд включена коронка специальной конструкции, которая жестко соединена с корпусом устройства, а в нижней части содержит специальные сквозные пазы для захвата и удержания породоразрушающих шаров, при этом верхняя часть корпуса струйного аппарата связана с гидроударником, с соответствующим соединением циркуляционных каналов и возможностью вращения с помощью колонны бурильных труб.

На рис. 1 приведена общая схема устройства [4], где 1 – корпус, 2 – струйный аппарат, 3 – породоразрушающие шарики. Корпус 1 в нижней части соединен со специальной коронкой 4, которая имеет некоторое количество сквозных пазов 5, которые предназначены для захвата и удержания породоразрушающих шариков 3. Верхняя часть корпуса 1, жестко соединенная с гидроударником 6, содержащим наковальню 7, шлицевые разъемы 8, клапан 9, поршень 10, силовые пружины 11 и 12 и предназначенным для создания ударных импульсов, которые через корпус 1 передаются на коронку 4. Привод гидроударника 6 осуществляется промывочной жидкостью, которая циркулирует по колонне бурильных труб.

Устройство работает следующим образом: при возникновении циркуляции промывочной жидкости во внутренней части корпуса 1 прибора начинается активное движение породоразрушающих шариков 3, которые взаимодействуют с породой забоя и разрушают ее. В этом отношении модернизированный снаряд полностью работает по принципу таковых вращательного действия, отличительным является механизм формирования периферийной зоны. При прямоугольной форме забоя скважины разрушение горного массива осуществляется исключительно шароструйным способом, а гидроударник 6 находится в нерабочем состоянии; промывочная жидкость, которая подается насосом, свободно проходит через него, попадая к струйному аппарату 2. Однако с увеличением кривизны забоя в контакт вступает специальная коронка 4, которая за счет такого взаимодействия вместе с корпусом 1 аппарата перемещается вверх. Это в свою очередь приводит к смыканию шлицевых разъемов 8 и перекрытию клапаном 9 отверстия в поршне 10. Таким образом, гидроударник 6 включается в работу. Под действием мгновенного роста давления клапан 9 вместе с поршнем-ударником 10 с большой скоростью движется вниз, сжимая силовые пружины 11 и 12. Поршень-ударник 10 под действием приобретенной кинетической энергии в конце хода осуществляет удар по наковальне 7 – дополнительного конструктивного

элемента корпуса 1 струйного аппарата 2. Ударные импульсы передаются корпусом 1 и специальной коронкой на породоразрушающие шарики 3, которые удерживаются в сквозных пазах 5. Достаточно большое количество пазов необходимо для удержания породоразрушающих шариков 3 и надежной передачи на них ударных нагрузок. За счет получения постоянных ударных импульсов породоразрушающими шариками, вращения и осевой нагрузки на забое скважины реализуется наиболее эффективный механизм разрушения крепких пород, а именно ударно-вращательный; при этом шарики 3 разрушают породу на забое и формируют его периферийную зону.

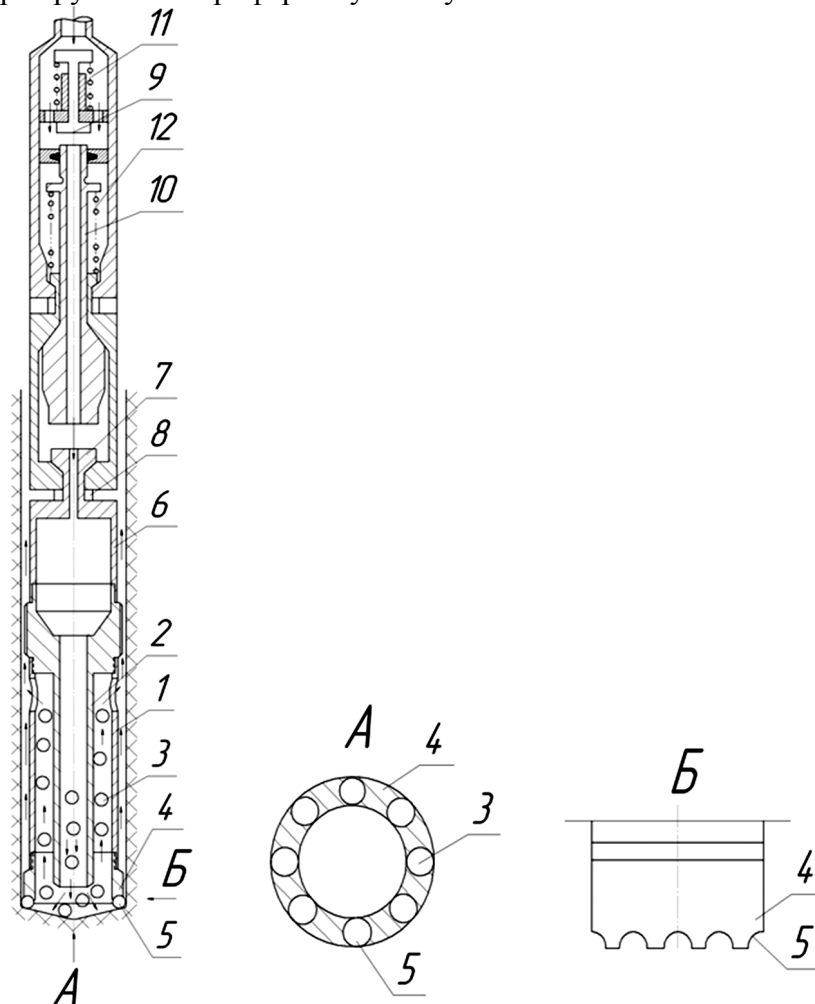


Рис. 1 Общая схема шароструйного снаряда с гидроударным приводом

Процессу механического разрушения твердого тела, т.е. образованию новой свободной поверхности под воздействием приложенных внешних нагрузок, всегда предшествует этап нагружения сосредоточенной нагрузкой [2]. Этот процесс при заданном характере распределения системы внешних сил характеризуется определенным распределением внутренних напряжений и связанных с ним деформаций, которые описываются известными соотношениями теории упругости. Дальнейшее развитие разрушения во многом определяется характером и интенсивностью этих напряжений (деформаций).

Расход энергии на измельчение (диспергирование) горных пород определяется известными энергетическими законами разрушения Риттингера и Кирпичева.

По закону Риттингера (1867 г.) «работа, затраченная при дроблении, пропорциональна вновь полученной (обнаженной) поверхности измельченного материала или степени измельчения».

Закон Кирпичева (1874 г.) сформулирован следующим образом «энергия, требуемая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных тел, изменяется как объемы или веса этих тел». Этот закон называется законом подобия и иногда формулируется

по другому: энергия, затраченная на дробление геометрически подобных тел при одинаковом напряженном состоянии пропорциональна объемам разрушаемых тел.

При применении этих законов предполагается, что при разрушении физическая природа тела остается неизменной и разрушаемые тела структурно однородны.

Установлено, что при тонком измельчении минеральных тел закон Риттингера соблюдается с большой точностью, а закон Кирпичева не подтверждается. В случае дробления относительно больших размеров тела (0,5 – 1 мм), т.е. при малой дисперсности, затраты работы по закону подобия будут большими, чем по закону Риттингера.

Объемная энергоемкость разрушения определяется отношением количества затраченной энергии к единице разрушенного объема горной породы. Порода в зоне разрушения может дробиться и диспергироваться, соответственно будет увеличиваться вновь образованная поверхность разрушения. С увеличением вновь образуемой поверхности на единицу объема, возрастает количество энергии затрачиваемой на ее образование. Соответственно общее количество энергии на разрушение единичного объема породы зависит от степени измельчения породы или от площади вновь образуемой поверхности (поверхностная энергия разрушения). При этом, чем больше вновь образованная поверхность или степень диспергирования породы, тем более энергоемким является процесс разрушения и наоборот.

В общем случае энергия на разрушение объема горной породы (уравнение Шрейнера Л.А. [2]) равна:

$$A = A_v V, \quad (1)$$

где A_v – энергия разрушения единичного объема, V – объем разрушенной породы.

Энергия на разрушение, отнесенная к единице объема или вновь образуемой поверхности, соответственно (уравнение Шрейнера Л.А. [2]):

$$A_v = \frac{25\sigma_u(1-\sigma^2)\pi^2 r^3 k_n}{E} / V, \quad A_s = \frac{2,5\sigma_u(1-\sigma^2)\pi r k_n}{E} / S, \quad (2)$$

где r , S – радиус и площадь штампа, E – модуль Юнга породы, V – объем разрушенной породы, k_n – коэффициент пластичности, σ_u – прочность по штампу, σ – нормальные напряжения.

Энергия на разрушение объема и площади соответственно (уравнение Мизеса [5]):

$$A_v = \frac{3}{2E}(1-2\sigma)\sigma_n^2 / V, \quad A_s = \frac{(1+\sigma)}{3E}\sigma_{сдв}^2 / V, \quad (3)$$

где σ_n , $\sigma_{сдв}$ – среднее нормальное напряжение и напряжение сдвига соответственно.

Энергия разрушения [6] объема (уравнение Шелковникова И.Г.):

$$A_v = \frac{S_{pn}^2 \rho^2 V_{pв}^2 V_{мв}^2}{4[\sigma_\delta] \cdot l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (4)$$

где $[\sigma_\delta]$ – динамическая прочность породы, S_{pn} – площадь контакта лезвия резца с породой, l – длина лезвия резца по контакту, $V_{pв}$, $V_{мв}$ – скорость продольной волны в материале резца и в породе соответственно, α – угол приострения лезвия резца, ρ – массовая плотность материала резца.

Определить затраты энергии в единицу времени можно также, исходя из формулы Сулакшина С.С. [7]:

$$A = 2\pi \cdot M \cdot F_{oc} \cdot n, \text{ Вт/мин.} \quad (5)$$

где M – крутящий момент, Нм; F_{oc} – осевое усилие, Н; n – количество оборотов, мин⁻¹.

Из вышеизложенного видно, что затраты энергии при разрушении определяются геометрическими параметрами породоразрушающего инструмента (4) и параметрами разрушения (5), а также позволяют их рассчитывать. Соответственно для точного решения задачи оптимизации бурения, могут служить энергетические характеристики процесса разрушения горных пород.

Механическая работа при разрушении определяется произведением силы на путь. Сила при разрушении пропорциональна прочности, а путь, т.е. деформация, в общем случае определяется модулем упругости и степенью пластичности. Модуль упругости в сочетании с прочностью дает значение упругой деформации до разрушения, а показатель пластичности – величину пластической деформации. Таким образом, об энергоёмкости разрушения можно судить, зная в общем случае три механические характеристики: прочность, упругость и пластичность. Для хрупких пород достаточно знать только прочность (прилагаемую нагрузку) и модуль упругости. Из этого также следует, что прочность не определяет энергоёмкость, а является только одной из ее составляющих.

Исследованиями установлено [8], что при вращательном бурении скважин со свободной подачей и полной очисткой забоя от шлама механическая скорость бурения в общем виде выражается функциональной зависимостью от ряда величин:

$$V_m = f(H_g, k_n, a, F_{oc}, n, Q_y) \quad (6)$$

где H_g – твердость горной породы; k_n – коэффициент пластичности породы; a – показатель абразивности; F_{oc} – осевая нагрузка; n – частота вращения породоразрушающего инструмента; Q_y – интенсивность удаления продуктов разрушения.

Эта функциональная зависимость в явном виде может иметь частные значения для каждого типоразмера породоразрушающего инструмента.

Таким образом, эффективность разрушения пород вращательным способом будет зависеть от свойств горных пород, а также от технических и технологических факторов.

Все перечисленные факторы в конечном итоге определяют условия, в которых происходят процессы разрушения пород, формирование ствола скважины и керна, искривление скважин и другие процессы [7]. От них также, зависит выбор наиболее рационального способа бурения скважин, типа (конструкции) забойного инструмента, бурового снаряда и режима его работы, и другие технологические параметры и операции.

К технологическим условиям относятся: режим работы забойного инструмента, режим удаления продуктов разрушения породы из скважины, гидродинамическое воздействие потока промывочной жидкости на забой скважины, динамическое воздействие колонны бурильных труб и другие факторы. Влияние основных из них учитывается в приведенной выше зависимости (6).

Технические условия, определяющие эффективность разрушения пород, включают: конструкцию (типоразмер) породоразрушающего инструмента и бурового снаряда, состояние забоя скважины – степень анизотропности породы на забое, наличие шлама, состояние стенок скважины и др. Следовательно на процесс бурения в значительной степени оказывают влияние параметры внешней среды, в частности: гидростатическое давление, плотность, вязкость жидкости в скважине, а также параметры технологического процесса бурения.

Эффективность разрушения горных пород в значительной степени характеризуется энергоемкостью процесса разрушения пород, работоспособностью применяемых породоразрушающих органов и параметрами среды, в которой происходит разрушение. Количество энергии, затрачиваемой на разрушение породы, зависит от режима работы породоразрушающих инструментов. Все эти параметры тесно связаны между собой, поэтому эффективность действия каждого из них будет определяться значением других.

Методы определения физико-механических характеристик горных пород, при простых видах напряженных состояний, не отражают действительного характера процессов, происходящих при разрушении породы на забое и не могут служить для определения энергоемкости процесса разрушения. Энергозатраты на разрушение горных пород определяются условиями нагружения. Этому требованию соответствует отрыв элемента от образца испытываемой породы.

Основным энергетическим показателем процессов разрушения горных пород является удельная объемная работа разрушения, под которой понимается отношение затраченной в процессе разрушения энергии к объему разрушенной породы. Величина удельной объемной работы характеризует энергоемкость процессов разрушения.

С физической точки зрения, полезной будет та часть работы, которая затрачивается на увеличение свободной поверхностной энергии. Эту работу аналитически можно выразить следующим образом:

$$A_s = E_p \Delta S, \quad (7)$$

где E_p – поверхностная энергия, Дж; ΔS – площадь вновь образовавшейся поверхности, м².

Поскольку показатели при разрушении породы определяются с одной стороны энергией связи минералов в породе и атомов в минералах, а с другой – затраченной энергией на преодоление и разрыв связей, то целесообразно применять энергетическую теорию разрушения твердых тел, определив ту часть введенной в породу энергии, которая расходуется на разрыв связей. Таким образом, в каждом случае необходимо знать не только общую затраченную на разрушение породы энергию, но и ту долю энергии, которая расходуется на разрыв связей, так называемую собственную энергоемкость породы или ее энергетическую характеристику сопротивляемости разрушению. При этом следует иметь в виду, что при любых способах воздействия на породу происходит отделение или отрыв от ее массива отдельных единичных элементов. Причем, каждый раз от массива отделяется столько, сколько позволяют его физико-механические свойства, что находит свое отражение в параметрах и форме разрушения. Поэтому по параметрам и форме разрушения могут быть определены и физико-механические свойства горных пород.

Одним из энергетических показателей процессов разрушения горных пород является удельная объемная работа разрушения A_v . Это объективный показатель для классификации горных пород по буримости, под которым понимается - отношение затраченной в процессе разрушения энергии A к объему разрушенной породы V , т.е. [2]:

$$A_v = \frac{A}{V} = \frac{E_n - E_k}{V} \quad (8)$$

где E_n – начальная энергия; E_k – конечная энергия.

Величина удельной объемной работы характеризует энергоемкость процессов разрушения. В связи с этим Л.А.Шрейнер [2] показал, что при использовании закона подобия необходимо учитывать масштабный фактор, т.е. явление, когда увеличение размеров разрушаемого образца из одного и того же материала приводит к уменьшению прочности. Это связано с увеличением вероятности появления критической трещины с увеличением размеров образца. Зависимость, описывающая масштабный эффект

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (9)$$

где σ_1 – прочность материала при площади сечения образца S_1 ; σ_2 – прочность материала при площади сечения образца S_2 ; $m = 2...6$ – показатель степени, зависящий как от вида дефектов, так и от нахождения их в теле (на поверхности, в объеме или на поверхности и в объеме одновременно), а также распределения дефектов по объему образца.

Влияние масштабного эффекта проявляется при измельчении горных пород до малых размеров конечного продукта. В этом случае энергоемкость разрушения повышается с уменьшением крупности конечного продукта. Особенно сильно масштабный эффект проявляется в том случае, когда измельчают кристаллы (зерна) минералов, поскольку число дефектов в них меньше чем в горной породе.

Энергоемкость разрушения объема V породы:

$$A_v = \frac{A}{V} = \frac{\sigma_\infty^2 k V_\infty^2}{E V_\delta V}, \quad (10)$$

где σ_∞ – прочность породы в большом объеме, которая не зависит от величины V ; V_∞ – объем породы, в котором расположена поверхность разрушения; V_δ – малый объем породы; k – коэффициент пластичности.

Из выражения (10) следует, что при увеличении объема V_δ энергоемкость разрушения породы уменьшается, а при уменьшении нагружаемого объема V_δ когда $V \rightarrow V_\delta$, энергоемкость разрушения увеличивается, то есть чем больше разрушаемый объем породы, тем меньше энергоемкость разрушения. Следовательно, целесообразно принимать нагружаемый объем V_δ величиной не менее V_∞ , тогда энергоемкость разрушения будет не более $\sigma_\infty^2 k / E$.

Таким образом, анализ имеющихся материалов показал, что достоверным критерием оценки эффективности разрушения горных пород является энергоемкость разрушения горной породы на забое. Согласно неравенству

$$[\sigma_{сж}] > [\sigma_{сдв}] > [\sigma_{ирп}] > [\sigma_p] \quad (11)$$

наивыгоднейшим видом деформации, с энергетической точки зрения, является разрушение отрывом.

Этот параметр отражает затраты энергии, приходящиеся на разрыв связей в материале при оптимальной схеме нагружения, то есть отрыве.

Выводы. Приведены краткие сведения по основным конструктивным особенностям нового гидромеханического снаряда. Изложены практические аспекты использования отличительных признаков разработанной модели устройства. Доказана перспективность предложенных конструктивных подходов к совершенствованию снарядов шароструйного бурения на основе фундаментальных положений теории разрушения горных пород. Авторские права на представленную конструкцию устройства защищены патентом Украины.

Список литературы

1. Разведочное бурение / А. Г. Калинин, О. В. Ошкордин, В. М. Питерский и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
2. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М. – Л. Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.

3. Давиденко А. Н., Игнатов А. А., Вяткин С. С. Некоторые вопросы гидромеханического способа бурения // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. – 2011. – № 14(181) – С. 75 – 78.
4. Пат. 81068 № u201212576 Україна, МПК Е 21В 7/00. Пристрій для буріння /А. О. Ігнатов. Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.
5. Барон Л.И. О научно-методических основах лабораторных испытаний горно-технологического характера. // Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского. - М.:Недра, 1960. – С.32.
6. Шелковников И. Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л.: Недра. 1977. – 85 с.
7. Сулакшин С.С. Технология бурения геологоразведочных скважин. – М.:Недра, 1973. – 319 с.
8. Rock deformation. A symposium Editors D.Griggs, J.Handin. The Geol. Soc. of America, Mem. 79, 1960. - С. 67-70.

УДК 553.98(477)

ПРОБЛЕМЫ ПОНЯТИЙ СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

*В.А. Баранов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,
Украина*

В.А. Кириченко, Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины, Украина

Показаны условия формирования структуры и текстуры осадочных пород, их трансформация на разных этапах преобразования и необходимость унификации геологических понятий для ликвидации разночтений в данном направлении.

В формировании осадочных горных пород участвуют различные геологические факторы: разрушение и переотложение продуктов разрушения ранее существовавших пород, механическое и химическое выпадение осадка из воды, жизнедеятельность организмов. Случается, что в образовании той или иной породы принимает участие сразу несколько факторов. При этом некоторые породы могут формироваться различным путём. Так, известняки, могут быть химического, биогенного или обломочного происхождения. Это обстоятельство вызывает существенные трудности при систематизации осадочных пород. Единой схемы их классификации пока не существует.

Различные классификации осадочных пород были предложены Ж. Лаппараном (1923 г), В.П. Батуриным (1932 г), М.С. Швецовым (1934 г) Л.В. Пустоваловым (1940 г), В.И. Лучицким (1948 г), Г.И. Теодоровичем (1948 г), В.М. Страховым (1960 г), и другими исследователями. Одна из последних полных классификаций представлена в «Справочнике по литологии» (1983 г) [1].

Однако для простоты изучения применяется сравнительно простая классификация, в основе которой лежит генезис (механизм и условия образования) осадочных пород. Согласно ей осадочные породы подразделяются на обломочные, хемогенные, органогенные и смешанные.

Собственно из осадков образуются *хемогенные* (соли) и обломочные, (терригенные) осадочные породы. Образование осадков происходит на поверхности земли, в её приповерхностной части и в водных бассейнах. Применительно к органогенным породам некоторыми исследователями термин «осадок» ставится под сомнение. Так если осаждение скелетов планктонных организмов ещё можно отнести к осадкам, то скелеты донных организмов, колониальных, например, кораллов, некоторые исследователи не знают куда