

О физиологии простейших способов погружения человека под воду (Конфуз императора).

Плутарх в 35 году до н.э. описал, как римский император Антоний, желая удивить египетскую царицу Клеопатру своим мастерством в рыбной ловле, поручил одному из своих ныряльщиков спрятаться под водой и насаживать рыбу на крючок. Однако ныряльщик Клеопатры оказался ловчее и опередил слугу Антония, насадив на крючок соленую рыбу. Обман раскрылся... Давайте разберем, как на практике могли исполнить то, что описал Плутарх, и в чем опасности подобных ныряний. Заодно вспомним ряд физических законов, важных для понимания основ водолазного дела.

Первое, что приходит на ум, когда пытаешься представить, как ныряльщик Антония мог исполнить свою задачу, -- он нырял на задержке дыхания. То есть набирал в грудь побольше воздуха, опускался под воду, тайно подплывал к месту развлечения хозяина, насаживал на крючок рыбку и уплывал. Просто это или сложно? Наверное, не очень просто: современники неплохо оплачивали ныряние в глубину. По свидетельству римского историка Тита Ливия, сообщавшего в своих трудах о коммерческом использовании ныряльщиков при подъеме утонувших сокровищ, в то время водолаз получал половину из поднятого с глубин более 7 м, треть -- с глубин от 3 до 7 м, одну десятую -- при погружениях на глубины не более метра...

Попробуйте задержать дыхание и выполнить несколько простых физических упражнений, например, приседаний. Обычный человек в неплохой физической форме способен, задержав дыхание на вдохе, проплыть под водой, не останавливаясь, 25 м. Отлично тренированный пловец выдюжит 50 м, задержав дыхание на 3-4 мин. Вряд ли ныряльщик Антония был способен на большее. За очень короткое время ему надо было успеть незаметно приблизиться под водой к месту рыбалки, найти крючок, насадить то, что нужно, и уплыть.

Вспомните, многое ли Вы можете увидеть, опустив голову под воду? Даже если освещение достаточное, изображение начисто лишено резкости. Это происходит из-за того, что человеческий глаз «настроен» на работу в воздушной среде, а не в водной. Глубина резкости зрительной системы ровно такова, чтобы фокусировать на сетчатке световые лучи, преломившиеся на границе «воздух-роговица», не больше и не меньше. Скорость распространения света в воде отличается от такого же показателя для воздуха, в воде световые волны бегут медленнее. Поэтому на границе с глазом свет, приходящий из воды преломляется не так, как приходящий из воздуха, а органы зрения об этом «не знают». Изображение фокусируется не на сетчатке, а очень далеко за ней, оно получается размытым, как буд-то бы человек одел совершенно не подходящие ему очень мощные очки [*сноска* В одной из следующих лекций мы отдельно поговорим об особенностях

зрительного восприятия под водой]. Даже на берегу, надев чужие очки, немногие смогут разглядеть рыболовный крючок и с легкостью насадить на него рыбу.

Скорее всего, ныряльщики Антония с трудом зрительно ориентировались под водой. В те времена приспособлений типа маски или плавательных очков не существовало, по крайней мере, нет тому свидетельств. Чтобы ощупью найти рыболовный крючок и насадить на него рыбу, следовало потратить не пару десятков секунд, а пару минут. Значит, на скрытное приближение и последующее удаление оставалось не более двух минут, -- далеко не уплывешь! [*сноска* Ласты в то время известны не были. Одно из первых описаний ласт дал Леонардо да Винчи на рубеже XV и XVI веков] Видимо, нужна была какая-то «хитрость». Прежде чем разобраться, в чем тут дело, коснемся трудностей свободного ныряния на задержке дыхания.

Если не трогать случаи спусков на рекордные глубины, превышающие несколько десятков метров, главная опасность состоит в потере сознания на подъеме. Сценарий выглядит так: человек опускается в глубину, потом, почувствовав, что исчерпаны запасы воздуха в легких, начинает подниматься и уже у самой поверхности, сам того не замечая, теряет сознание и тонет. Причина -- острое кислородное голодание, т.е. недостаток кислорода в крови. Почему на подъеме? И почему вблизи поверхности?

Кислород в кровь поступает из легких. В данном случае кислород в легких заканчивается. И заканчивается именно на подъеме и вблизи поверхности. Вначале, когда ныряльщик набирает грудью воздух, кислорода в легких много. По мере погружения и выполнения работы кислород расходуется, и его остается все меньше и меньше. Вместо кислорода образуется углекислый газ, который из крови выделяется в легкие.

Под водой гидростатическое давление «сжимает» грудную клетку, уменьшая объем легких. Число молекул любого газа, в том числе и кислорода, в единице объема легких увеличивается. [*сноска* В водолазной физиологии и медицине абсолютное содержание молекул газа в единице объема и изменения этой концентрации принято выражать через величину парциального давления газа] Обратите внимание, с кислородом, который находится в легких, одновременно происходит два процесса: а) замена молекул кислорода молекулами углекислого газа; б) увеличение концентрации молекул кислорода в единице объема за счет сжатия легких извне.

При подъеме грудная клетка расширяется за счет снижения внешнего давления, и происходит обратная реакция, число молекул газа на единицу объема снижается. Поэтому тогда, когда человек начинает всплывать, концентрация молекул кислорода в легких начинает убывать не просто быстро, а очень быстро, буквально стремительно: не только потому, что

кислород расходуется организмом для обеспечения жизнедеятельности, но еще и дополнительно за счет расширения грудной клетки.

И это не вызывает никаких субъективных или объективных реакций. Организм устроен так, что он «не чувствует», много или мало у него кислорода. Организм «ощущает» углекислый газ. Особые сенсоры, называемые хеморецепторами, [*сноска* Они расположены в сонных артериях на шее] реагируют на высокую концентрацию углекислого газа в крови, подают специальные сигналы в головной мозг, и человек испытывает потребность дышать как можно сильнее (одышка). Всякий раз, когда Вы задерживаете дыхание, у Вас возникает нестерпимое желание вдохнуть именно потому, что в легких и крови накапливается много углекислого газа. В нашем случае на всплытии рост числа молекул углекислого газа в единице объема легких как бы замедляется, потому что грудная клетка расширяется за счет снижения внешнего давления. Замедляется и повышение концентрации углекислого газа в крови, не подавая «сигнала тревоги».

Получается, что в легких ныряльщика, поднимающегося из глубины, с одной стороны, быстрее обычного падает концентрация кислорода, а с другой, замедленно нарастает концентрация углекислого газа, дезориентируя организм относительно грозящей опасности. В результате человек теряет сознание и гибнет.

Причем, чем ближе к поверхности поднимается ныряльщик, тем сильнее относительные изменения объема сдавленной грудной клетки и, соответственно, те относительные изменения абсолютных концентраций газов в дыхательной системе, которые обусловлены действием внешнего давления. Каждый метр глубины обеспечивает появление дополнительных 0,1 кгс/см² (0,1 ати) гидростатического давления. При подъеме с 10 м до 5 м избыточное окружающее давление уменьшается на 50%, при подъеме с 5 м до 1 м -- на 80%. Поэтому критические изменения концентрации кислорода в легких, ведущие к острой гипоксии, развиваются буквально на последних метрах подъема.

Итак, ныряльщик Антония под водой практически ничего не видел и должен был погружаться под воду в непосредственной близости от места выполнения задачи, что нарушало скрытность операции. Если же он подплывал к назначенному месту издалека, чтобы его не видели, то времени на выполнение каких-либо манипуляций практически не оставалось.

Чтобы исправить ситуацию он мог воспользоваться приспособлением, давно известным к тому времени. Он должен был взять с собой запас воздуха. Например, в перевернутой вверх дном бочке. Или в бурдюке, т.е. в кожаном мешке. Почти за 800 лет, т.е. за восемь веков! до разбираемого эпизода в городе Нимруд построили дворец, стены которого украсили барельефами,

изображающими воинов, дышащих под водой из кожаных мешков, заполненных воздухом [*сноска* Барельефы из Нимруда считают одним из старейших документальных свидетельств древнего водолазного снаряжения]. Такое бесхитрое оборудование могло обеспечить автономность, вполне достаточную для того, чтобы нанизать рыбу на крючок ура-рыболова. Однако при всей своей гениальной простоте и универсальности этот способ пребывания человека под водой не очень удобен.

Вспомните, в предыдущей статье "Плавание с трубкой для дыхания" мы рассматривали возможность дыхания под водой через длинную трубку, выставленную на поверхность, и убедились, что тот способ водолазных погружений ограничен глубиной около 1 м. Попытки дышать воздухом под атмосферным давлением на глубинах больших 1 м быстро приводят к серьезным и опасным нарушениям здоровья: развивается либо обжатие грудной клетки, либо барогипертензионный синдром. В отличие от случаев дыхания через трубку использование дыхательного мешка подобного недостатка лишено. На любой глубине ныряльщик сможет вдохнуть из емкости воздух. И на 1 м, и на 5 м, и на 10 м, и даже на 100 м. Главное, чтобы в бурдюке был газ.

Надолго ли хватит запаса воздуха, если вдох делать из мешка, а выдыхать прямо в воду, т.е. дышать по так называемому открытому циклу, как в акваланге? Каждый вдох предполагает расход не менее 0,5 л газа, (Это в состоянии покоя, при физической нагрузке объем вдоха составляет не менее 1 л) в минуту человек совершает от 12 до 30 и более вдохов-выдохов. Следовательно, минутный расход воздуха составит около 20 л (6-60 л). Объем 10 л легко представить себе как крупное хозяйственное ведро, заполненное воздухом. Такого объема хватило бы на ½ минуты. Куб воздуха с гранью, равной высоте листа бумаги формата А4, составит по объему чуть более 20 л и обеспечит дыхание в течение 1 минуты. Тот же объем имеет газовый пузырь диаметром около трети метра (34 см). Воздушный куб с гранью 50 см или сфера диаметром 62 см достаточны для дыхания в течение 5 мин.

Учтем, что при погружении под воду воздушный мешок оказывается сдавленным со всех сторон силой гидростатического давления. По законам физики увеличение внешнего давления на газовый пузырь приводит к пропорциональному уменьшению его объема (Закон Бойля, $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$). На глубине 5 м 10-литровый пузырь «сожмется» до 6,5 л, а на глубине 10 м -- до 5 л. Значит, на глубине 5 м запаса воздуха в бурдюке хватит уже не на половину минуты, а только на 20 сек., а на глубине 10 м -- лишь на четверть минуты.

А что если дышать не по открытому циклу, а по замкнутому, т.е. выдох делать не в воду, а обратно в мешок? Ничего хорошего. Для интереса

попробуйте вечером в постели укрыться с головой одеялом и засечь время, в течение которого Вы сможете «продержаться» без глотка свежего воздуха. Речь пойдет всего об 1-2 минутах и это при условии, что Вы лежите спокойно, не совершая никакой работы! Почему же Вам не хватило воздуха?

Потому что в газовой смеси, которой Вы пытались дышать под одеялом, накопилось слишком много углекислого газа. Кислорода там также осталось не очень много, однако общее его содержание тогда, когда Вы уже «задыхаетесь», еще вполне достаточно, чтобы не умереть. Каждую минуту человек потребляет от 300 мл до 3 л чистого кислорода, в среднем 1-1,5 л, и выделяет столько же углекислого газа. Опытным путем установлено, что дыхание газовыми смесями, где концентрация CO₂ превышает 1% (при нормальном давлении) вызывает одышку, а концентрации CO₂ порядка 5-6% бывают уже смертельно ядовитыми. Если дышать по замкнутому циклу при нормальном давлении ведром обычного атмосферного воздуха, в котором углекислого газа ничтожно мало, через 1 мин. концентрация CO₂ составит около 10%. Если объем воздуха, доступного для дыхания, будет равен 30 л, то концентрация углекислого газа через минуту достигнет 3%, что вызовет очень сильную, практически «невыносимую» одышку у водолаза.

Однако не забывайте, что мы ведем речь о дыхании из мешка под водой, где газовые объемы испытывают сдавливающее действие гидростатического давления. Абсолютная концентрация ядовитого углекислого газа, т.е. число его молекул на единицу объема, возрастает пропорционально повышению внешнего давления и снижению общего объема бурдюка. Значит, допустимое время дыхания пропорционально снижается! На глубине 5 м 3%-ая концентрация CO₂ в 30-литровом мешке будет достигнута не через 1 минуту, а через 40 сек.! При дыхании по открытому циклу 30 л воздуха на глубине 5 м «хватит» на 1 мин., т.е. чуть-чуть дольше. Вряд ли стоит сравнивать «эффективность» открытого и закрытого циклов дыхания в случаях простейшего использования дыхательного мешка. Показатели такой эффективности весьма близки. Гораздо важнее понять и запомнить, что все они одинаково неэффективны.

Лучше давайте представим, как опустить такой дыхательный мешок под воду. Газ на три порядка (в тысячу раз!) легче воды. Следовательно, чтобы обеспечить погружение газового пузыря под воду, к нему необходимо добавить «лишний вес». На пузырь объемом 1 л действует выталкивающая сила около 1 кг, на 30-литровый -- около 30 кг. Для компенсации такой плавучести просто «привесить» к пузырю соответствующий груз совсем недостаточно. Разность в плотности воды и тех предметов, что используются в качестве грузов (камни, железо), отличается отнюдь не в сотни и десятки раз, эти грузы, помещенные в воду, сами «теряют в весе», поэтому приходится навешивать грузы, превышающие по весу выталкивающую силу пузыря в 1,5, а то и в 2 раза.

Представляете, чтобы подышать под водой около 1 минуты, необходимо взять с собой в мешке 30 л воздуха (куб с гранью около 32 см или сфера диаметром около 39 см) и привесить к нему груз 40-50 кг! Чтобы получить автономность 3 минуты, нужен 90-литровый мешок диаметром чуть более половины метра и дополнительные грузы весом около 130-150 кг! Очевидно, такой метод водолазания в техническом отношении весьма сложен.

С точки зрения медицины главная опасность этого способа погружения состоит в следующем. Вдох из мешка всегда осуществляется под тем давлением, которое соответствует гидростатическому давлению воды на глубине погружения самого мешка. Такое давление формируется в легких, не больше и не меньше. Если после вдоха пловец закроет дыхательные пути, т.е. задержит дыхание, полость легких превратится в замкнутую полость. Любые дальнейшие изменения глубины погружения будут сопровождаться изменениями внешнего гидростатического давления и соответствующими изменениями объема того газового пузыря, который оказался «заперт» в полости легких. При погружении он будет спадаться, а при всплытии -- расширяться. Проваливание водолаза в глубину сопровождается развитием обжатия грудной клетки, а при неожиданном подъеме к поверхности легочная ткань просто разрывается газом, «распирающим» грудь изнутри, что называют баротравмой легких (в зарубежной литературе нередко именуют артериальной газовой эмболией, arterial gas embolism или AGE).

Наиболее опасны в этом отношении так называемые малые глубины. Мы уже вспоминали выше, что здесь наиболее выражены относительные перепады избыточного гидростатического давления, и чем ближе к поверхности, тем сильнее относительные изменения объема замкнутого газового пузыря. Легкие, наполненные на глубине 5 м воздухом, на поверхности «хотят» увеличить свой объем на 50% (с 5 л до 7,5 л!). Именно по этой причине на первых же занятиях в клубе подводного плавания инструктор учит Вас **ни в коем случае не задерживать дыхание, особенно на подъеме.**

Так, что же император Антоний? Думаю, его ныряльщики, как и ныряльщик Клеопатры, комбинировали известные им способы погружений под воду. Приготовив рыбу и нырнув в стороне от места рыбалки, какой-то отрезок пути к месту выполнения своего ответственного задания они могли проплывать, используя дыхательную трубку. Далее, для обеспечения полной скрытности они задерживали дыхание и насаживали рыбу на крючок. На этом этапе запас воздуха заканчивался. Поэтому на месте выполнения работ под водой должен был быть спрятан бурдюк с воздухом, из которого ныряльщики делали вдох и уплывали.

Почему мы говорим о нескольких ныряльщиках, когда Плутарх упоминает одного? Вы прекрасно знаете из личного опыта, что после каждого опыта по задержке дыхания необходимо несколько минут, чтобы организм «пришел в форму», т.е. восстановил баланс газов, растворенных в крови, а иначе задерживать дыхание на сколько-нибудь долгое время не удастся.

Следовательно, в скрытной операции по созданию рыболовного имиджа Антония должно было быть задействовано несколько ныряльщиков. Если бы ныряльщик был один, эффективность его работы в силу действия законов физиологии неизбежно должна была бы прогрессивно ухудшаться от одного ныряния к другому.

Кстати, может быть именно это, т.е. полное невнимание к поддержанию высокой работоспособности водолазов (если ныряльщик действительно был один), и послужило главной причиной провала всей операции. По мере увеличения числа рыб, успешно насаженных на крючок, у ныряльщика прогрессивно накапливалась усталость, проявлялись небрежность и ошибки в работе, и его с легкостью обнаружили. И уже далее изрядно уставший ныряльщик Антония никак не мог соперничать со своим полным сил конкурентом, посланным царицей Клеопатрой. В таком случае эту историю можно считать блестящим примером, подтверждающим важность того, что в сегодняшних условиях называют медицинским обеспечением водолазных спусков и работ (Под медицинским обеспечением понимают комплекс мероприятий по сохранению и укреплению здоровья лиц, занятых на подводных работах, и по повышению производительности их труда).