



Игорь Андерсон - Adv Trimix TDI; Full Cave TDI; Adv Wreck TDI; Divemaster PADI
Киев 2010

Что же такое Градиент фактор?

Последние версии программного обеспечения для наиболее популярных среди технических дайверов подводных компьютеров VR 3, VR X, Liquivision X1, Shearwater Predator содержат такой изменяемый параметр как Градиент фактор. Кроме того этот параметр есть в программе Deco-planner. Например, на компьютере VR X этот параметр, по умолчанию, стоит 20/85, а в Shearwater Predator 30/85, в программе Deco-planner по умолчанию, стоит 20/85. Что же такое Градиент фактор?

Немного истории:

Основоположником классической теории декомпрессии принято считать шотландского физиолога Джона Скотта Халдейна (John Scott Haldane), который, вместе с коллегами Бойкотом (Boycott AE) и Дамантом (Damant GCC), провел по заказу ВМФ Великобритании серии экспериментов на козах в барокамере. Результатом их работы стала ныне классическая статья The Prevention of compressed air illness, опубликованная в Journal of Hygiene, Лондон, 1908 год, №8, страницы 342-443. Таким образом, впервые появилась простая математическая модель, описывающая поведение молекул биологически инертного газа в различных тканях тела. Халдейн предложил

представить тело набором тканевых компартментов, каждый из которых насыщается газом и насыщается с определенной скоростью. При этом компартменты по Халдейну предполагались перфузионно-параллельными, то есть подвергались воздействию повышенного давления одновременно. Диффузия молекул газа из одной ткани в другую в рамках данной модели не предусматривалась .

Вкратце повторим вывод первой декомпрессионной модели. В основе лежит фундаментальный закон, описывающий многие переходные процессы в природе, такие как диффузия и теплопроводность:

$$dp/dt = k(P_{in} - p) , (1) \text{ здесь}$$

P_{in} - парциальное давление инертного газа во вдыхаемой смеси в данный момент,
 p - парциальное напряжение инертного газа в компартменте в данный момент,
 K - константа, характеризующая физические свойства процесса переноса. Строго говоря, кислород тоже способен вызывать ДКБ при высоких парциальных давлениях, при полном связывании гемоглобина. При этом он начинает растворяться в плазме крови и вести себя, подобно биологически инертному газу.

t - время иначе говоря, мгновенная скорость абсорбции биологически инертного газа тканью (изменение его парциального напряжения в ткани) прямо пропорциональна градиенту парциального давления газа на границе газообмена (альвеолы легких - ткань).

Теперь вернемся к выводу уравнения Халдейна. Итак, основной движущей силой в процессе насыщения тканей инертным газом является градиент парциальных давлений-напряжений. Градиентом называется вектор, показывающий направление наискорейшего изменения некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой. Найдем частное решение однородного дифференциального уравнения первого порядка (1) при условии постоянного давления (то есть решим задачу для одноуровневого погружения, пренебрегая изменением давления при погружении и всплытии, как и сделал Халдейн).

$$dp/dt + kp = kP_{in} , (2)$$

опустим математические выкладки (желающие могут попрактиковаться в дифференциальном исчислении сами или обратиться к работе Эрика Бэйкера (Eric Baker

Derivation of Gas Loading Equations) и перейдем сразу к полученному решению:

$$p = p_0 + (P_{in} - p_0)(1 - e^{-kt}) , (3)$$

Это уравнение известно теперь как уравнение Халдейна. Здесь

p - конечное парциальное давление инертного газа в компартменте,

p_0 - начальное парциальное напряжение инертного газа в компартменте,

P_{in} - парциальное давление инертного газа во вдыхаемой смеси,

t - время воздействия,

k - константа, характеризующая физические свойства процесса переноса

Таким образом, получили экспоненту с отрицательным показателем, то есть процесс насыщения и насыщения тканей идет с экспоненциальным затуханием. Положим $p_0 = 0$, а $p = P_{in} / 2$ и найдем из уравнения (3) временной промежуток ?, за который парциальное давление инертного газа в ткани достигнет своего половинного значения по сравнению

с давлением во вдыхаемой смеси.

$$e^{-k\tau} = \frac{1}{2}, \quad (4)$$

$$-k\tau = \ln(1/2) = -\ln 2, \quad (5)$$

$$\tau = \ln 2 / k, \quad (6)$$

Переменная τ здесь - время полунасыщения (в дальнейшем будем обозначать ее $t_{1/2}$). С помощью этого параметра можно охарактеризовать тканевые компартменты. Халдейн выделил 5 компартментов со временами полунасыщения, равными соответственно 5, 10, 20, 40 и 75 минут. Хочется отметить, что гипотетические тканевые компартменты не имеют ничего общего с реальными тканями тела. Это не более чем математическая модель! Представление процесса насыщения гипотетических тканевых компартментов с временами полунасыщения 5, 10, 20, 40 и 75 минут в координатах время - парциальное напряжение инертного газа в тканевом компартменте. Иными словами, пятиминутный компартмент будет абсорбировать половину максимально возможного количества газа за 5 минут. Спустя следующие 5 минут тот же самый компартмент поглотит половину оставшегося количества газа и так далее. В то время как двадцатиминутный компартмент насытится на половину за 20 минут.

Вторая гипотеза Халдейна заключалась в предположении, что ткани тела способны выдерживать определенный избыток растворенного инертного газа (т.е. находиться в состоянии перенасыщения) без образования свободной газовой фазы (пузырьков). После серии экспериментов, было обозначено максимальное перенасыщение тканей, так называемое TR (tissue ratio), являющееся отношением суммарного напряжения тканей к окружающему давлению. Было принято TR равное 2:1. То есть, согласно Халдейну, дайвер, находившийся на 10 метровой глубине достаточно долго для того, чтобы достигнуть равновесного состояния между концентрацией инертного газа в его тканях и парциальным давлением газа в альвеолах легких (то есть состояния полного насыщения), мог мгновенно подняться на поверхность без каких-либо симптомов декомпрессионного заболевания. В настоящее время в это верится с трудом, но на тот момент это была единственная модель, описывающая процессы, происходящие в тканях тела при повышении давления. Модель Халдейна явилась прообразом и основой для всех последующих теорий и таблиц декомпрессии. Первые декомпрессионные таблицы были опубликованы в 1912 году и, несмотря на слабое приближение к идеалу, использовались в течение длительного времени. Слабое место халдейновских таблиц заключалось в особенностях планирования длительных и глубоководных погружений (применение данной модели для расчета подобных профилей приводило к значительному числу случаев ДКБ). Вплоть до 60-х годов 20 века халдейновская теория претерпевала лишь незначительные изменения (например, увеличение числа тканевых компартментов).

В середине 60-х годов Роберт Воркмэн (Robert Workman), выполняя декомпрессионные исследования по заказу ВМФ США, пришел к ряду любопытных заключений. К этому времени уже было известно, что кислород не является значительным фактором, влияющим на возникновение декомпрессионного заболевания. Приняв это во внимание, Воркмэн пересчитал TR Халдейна - согласно Воркмэну это отношение выглядит как парциальное напряжение азота в тканях отнесенное к окружающему давлению и максимальное безопасное значение его равно 1,58:1, а затем и вовсе предположил, что значение допустимого перенасыщения варьирует в зависимости от типа компартмента и глубины погружения. Экспериментальные данные показали, что «быстрые» (то есть

обладающие малыми временами полунасыщения) компартменты способны вынести больший избыток инертного газа, чем «медленные» (характеризующиеся большими временами полунасыщения), а также для всех компартментов коэффициент допустимого перенасыщения падает по мере возрастания глубины (давления). В дальнейшем, Воркмэн отказывается от устаревшего представления перенасыщения и вводит особую функцию - M-оценку (M от англ. maximum), характеризующую максимально допустимое парциальное напряжение инертного газа (то, при котором не происходит образование пузырей) для определенного компартмента на определенной глубине. M-оценки по Воркмэну выражаются простым линейным уравнением:

$$M = M_0 + \Delta M d \quad (7),$$

где M - максимально допустимое (не приводящее к образованию пузырей) парциальное напряжение инертного газа для заданного компонента, определенное на заданной глубине

M_0 - максимально допустимое парциальное напряжение инертного газа при 1 АТА, определенное для каждого компартмента.

ΔM - приращение M по мере увеличения давления (то есть изменение M с глубиной)

d - глубина

Подобная форма представления была значительным прорывом в эволюции фазовых декомпрессионных моделей. Теперь была принята концепция линейной зависимости между глубиной (давлением окружающей среды) и максимально допустимым напряжением инертного газа в каждом из гипотетических тканевых компартментов. Эта концепция до сих пор является важным элементом современных фазовых моделей. Итак, расчет профиля всплытия выполняется следующим образом: для определения глубины декомпрессионной остановки, на каждой глубине рассчитываются значения парциального напряжения инертного газа для каждого компартмента. Эти значения сравниваются со значениями M-оценок. При приближении парциального напряжения инертного газа в каком-либо компартменте к M-оценке возникает декомпрессионное обязательство. При этом, компартмент, лимитирующий процесс всплытия называется «лидирующим» компартментом. Таким образом, для успешной декомпрессии, необходимо создать максимальный градиент, то есть находиться как можно ближе к поверхности, но не превышать значения M-оценки лидирующего компартмента.

Следующим значительным шагом стало дополнение, сделанное американским исследователем Хэнсэм Шрейнером (Hence Schreiner) в конце 60-х - начале 70-х годов 20 века. Самым весомым его вкладом в развитие фазовых моделей стало решение уже знакомого нам дифференциального уравнения газообмена для случая линейного изменения давления окружающей среды, то есть для погружения и всплытия с постоянной скоростью.

Перепишем его еще раз: $dp/dt = k(P_{in} - p)$ и, поскольку формат данной работы не предусматривает подробное описание математического аппарата, сразу перейдем к полученному Шрейнером решению:

$$p = P_{in0} + R(t - 1/k) - [P_{in0} - p_0 - (R/k)] e^{-kt} \quad (8),$$

здесь P_{in0} - начальное альвеолярное парциальное давление инертного газа (Хочется обратить внимание на то, что Шрейнер использовал для расчетов давление газа именно в альвеолах, а не во вдыхаемой смеси. Подробнее это будет рассмотрено ниже.),

p_0 - начальное парциальное напряжение инертного газа в компартменте,

R - скорость изменения парциального напряжения газа по мере изменения давления

окружающей среды (то есть скорость погружения/всплытия умноженная на фракцию инертного газа),

t - время воздействия,

k - константа полунасыщения, равная $\ln 2/t_{1/2}$

Иными словами, Шрейнер нашел общее решение дифференциального уравнения, что позволило точно подсчитать парциальное давление инертного газа в гипотетическом компартменте в зависимости от времени экспозиции как для случая пребывания на постоянной глубине, так и для ступенчатого погружения или всплытия. При $R = 0$ (постоянная глубина) уравнение Шрейнера переходит в знакомую уже форму - уравнения Халдейна. Уравнение (8) хорошо подходит для моделирования погружений в декомпрессиметрах. При аналогичных прочих параметрах оно дает более точное приближение к реальному профилю давления в тканях тела, чем уравнение Халдейна. Кроме этого впервые декомпрессионная теория была описана в терминах физиологии человека, а именно, Шрейнер уделит внимание следующим вопросам: транспорт газа в крови к различным тканям, растворимость газа в органах и средах организма, состав тканевых компартментов, альвеолярное парциальное давление инертного газа (в сравнение с парциальным давлением во вдыхаемой смеси). На последнем остановимся подробнее. Дыхательная смесь, проходя через верхние дыхательные пути насыщается водяным паром, который разбавляет ее, помимо этого в процессе газообмена в легких выводится образовавшийся диоксид углерода, а кислород из газовой смеси переходит в растворенное состояние (в кровеносную систему). При этом соотношение между скоростями фазового перехода углекислого газа и кислорода составляет 0,8. (В нормальных условиях на границе газообмена растворяется 250 мл/мин O_2 и выводится из раствора 200 мл/мин CO_2 ; $200/250 = 0,8$). Это соотношение обозначают RQ (respiratory quotient). В зависимости от физической нагрузки и питания RQ может варьировать от 0,7 до 1,0. Шрейнер в расчетах принимал RQ равным 0,8. Итак, теперь можно подсчитать приближенное к реальному парциальное давление инертного газа в альвеолах легких:

$$P_{al} = [P_{amb} - p_{H_2O} - p_{CO_2} + :PO_2]F, \quad (9)$$

или

$$P_{al} = [P_{amb} - p_{H_2O} - ((1-RQ)/RQ)p_{CO_2}]F, \quad (10)$$

здесь P_{al} - парциальное давление инертного газа в альвеолах,

P_{amb} - давление окружающей среды (то есть давление вдыхаемой смеси),

p_{H_2O} - парциальное давление водяного пара в дыхательных путях (при 37°C равно 0,0627бар),

p_{CO_2} - парциальное давление CO_2 в дыхательных путях (в среднем 0,053 бар),

$:PO_2$ - приращение парциального давления O_2 в процессе газообмена в легких,

RQ -соотношение скоростей фазовых переходов CO_2 и O_2 ,

F - фракция инертного газа в дыхательной смеси

Полученное при подсчете с использованием данного равенства значение парциального давления Шрейнер использовал в дальнейших расчетах по уравнению (8).

Параллельно с другими исследователями над разработкой фазовой модели трудился профессор Альберт Бульманн. Он начал свою деятельность в 1959 году в лаборатории гипербарической физиологии университетского госпиталя в Цюрихе. Выполняя исследования на протяжении более 30 лет, Бульманн внес свой вклад в декомпрессионную науку в виде опубликованной в 1983 году в Германии книги «Декомпрессия - Декомпрессионная болезнь». И хотя, большинство идей, изложенных

там, принадлежали не ему, труд Бульманна стал, по сути, первым изданием, претендующим на полноту изложения материала по декомпрессионным вычислениям. В результате этого, алгоритм Бульманна явился основой для большинства декомпрессионных программ- планировщиков. Книга выдержала еще 3 издания в Германии под названием «Tauchmedizin» (Медицина дайвинга). Бульманновский метод декомпрессионных вычислений более всего походил на разработки Воркмэна. Он включал в себя М-оценки, выражающие линейную зависимость между внешним давлением и допустимым парциальным напряжением инертного газа в тканях. Основная разница между двумя этими подходами заключалась в методе подсчета М-оценок. У Воркмэна этот критерий основывался на гидростатическом давлении, а у Бульманна - на абсолютном. Что не удивительно, если вспомнить, что разработки Воркмэна проводились для военно-морских сил США (то есть подразумевались погружения с уровня моря), а Бульманн был ориентирован на погружения в высокогорных озерах Швейцарии. Итак, Бульманн переписал линейное уравнение для выражения М-оценок вида $y = mx + b$ ($M = M_0 + \lambda M_d$) в форме $x = (y-b)/m$ ($d = (M - M_0)/\lambda$) и, переходя к абсолютному давлению, ввел коэффициенты:

$$a = M_0 - \lambda P_{amb} \text{ s.l.} \quad (11)$$

и

$$b = 1/\lambda M \quad (12),$$

где $P_{amb} \text{ s.l.}$ - абсолютное давление окружающей среды на уровне моря (от англ. sea level)

Коэффициент a - значение парциального напряжения инертного газа при пересечении графика функции с осью ординат ($P_{amb} = 0$), коэффициент b - котангенс угла наклона прямой .

В результате выражение для М - оценок приобрело следующий вид:

$$P_{amb.tol} = (p_{in} - a)b \quad (13),$$

где $P_{amb.tol}$ - максимально допустимое внешнее давление (абсолютное),

p_{in} - парциальное напряжение инертного газа в тканевом компартменте (абсолютное)

Графическое представление М-оценок Бульманна в координатах окружающее давление - парциальное напряжение инертного газа. $P_{amb.tol} = (p_{in} - a)b$. 5-минутный компартмент, инертный газ - азот. Коэффициент a - значение парциального напряжения азота в точке пересечения графика функции с осью ординат, то есть при абсолютном давлении равно нулю; $1/b$ - тангенс угла наклона прямой. Таким образом, можно легко переходить от М-оценок Воркмэна к аналогичным показателям Бульманна.

Положив в основу более ранние разработки создателей классической теории декомпрессии, а также собственные дополнения, Бульманн представил две серии алгоритмов, ZH-L12 (1983 год) и ZH-L16 (1990 год)⁴. Серия ZH-L12 содержит в основе 12 пар коэффициентов для 16 компонентов, значения М-оценок для которых было определено эмпирически. ZH-L16А базируется на 16 парах коэффициентов для 16 компонентов, а М-оценки вычислены математически. Декомпрессионный алгоритм ZH-L16 впоследствии был подразделен на В и С, так как испытания показали недостаточную корреляцию теоретических М-оценок с эмпирическими значениями в диапазоне «средних» тканей. Модифицированный алгоритм ZH-L16В (более консервативный нежели А) был предложен для составления таблиц, а алгоритм С (еще более консервативный) - для программирования наручных real-time декомпрессионных программ.

До конца 90-х годов 20 века большинство дайв-компьютеров работали по алгоритму ZH-L16C5.

В названии алгоритмов ZH означает «Цюрих» - родной город профессора, L - линейный, 12 или 16 - число пар коэффициентов (M-оценок) для массива тканевых компартментов для гелия и азота. Бульманн впервые предложил использование газовых смесей, содержащих гелий, азот и кислород в различных соотношениях, предполагая независимое выведение этих газов из тканей.

M-оценки в других моделях.

M-оценки модели M11F6 были разработаны Биллом Гамильтоном (Bill Hamilton) для Шведских Военно-Морских сил. Этот набор M-оценок использовался для составления некоторых декомпрессионных таблиц, применяемых в техническом дайвинге.

PADI Recreational Dive Planner использует совокупность M-оценок рассчитанных Раймондом Роджерсом (Raymond Rogers) и Майклом Повеллом (Michael Powell) из DSAT (Diving Science and Technology Corporation). Так как PADI RDP предназначена для планирования «бездекомпрессионных» погружений, то есть дайвер, использующий эту таблицу должен иметь возможность подняться на поверхность в любой момент.

Итак, классическая декомпрессионная теория предполагала предотвращение фазового перехода жидкость - газ в тканях. Но ближе к концу 20-го века становилось очевидным, что допущения, на которых она основывается, далеко не полностью отвечают реальным процессам, происходящим в организме в гипербарических условиях. Так, традиционно считалось, что при образовании газовой фазы в тканях и органах тела развивается ДКБ.

Но некоторыми исследователями были описаны а симптоматические пузырьки азота, так называемые «тихие» или «молчащие» пузырьки (silent bubbles). Появление ультразвукового детектора Доплера лишь подтвердило то, что ткани насыщены микропузырьками после каждого погружения, даже после «бездекомпрессионного».

Более того, экспериментируя с профилями погружений, отдельные испытатели находили более комфортным и безопасным профиль, содержащий остановки в глубокой части всплытия. Объяснить это в рамках классической модели было невозможно.

Необходимы были новые подходы к декомпрессии.

Собственно рассуждения о Градиент факторе и рекомендации по настройке..

В исторической справке была приведена почти прямая цитата из статьи Анны Козловой, инструктора TDI, Андрея Чистякова, инструктор-тренера TDI Дахаб, 2007, для того, чтобы обратить внимание читателей на то, что алгоритм Бульманна ZH-L16C является моделью насыщения(фазовой моделью). И рассуждения о поведении пузырьков в рамках модели насыщения(фазовой модели) некорректны. Рассуждения о поведении пузырьков корректны в рамках микропузырьковых моделей таких, как VPM (Varying Permeability Model), разработанная Давидом Юнтом (David Yount) и RGBM - Reduced Gradient Bubble Брюса Винке (Bruce Wienke). Программное обеспечение, основанное на модели VPM B/E может быть установлено на компьютер Luquivision X1, а RGBM используется в компьютерах фирмы Suunto..

Итак:

Декомпрессионный алгоритм Градиент-фактора тесно связан с моделью Бульмана,

рассматривающую 16 гипотетических тканевых компартментов (ТК) в каждом из которых отслеживается уровень насыщения инертным газом. По мере всплытия внутреннее давление инертного газа в ТК начинает уменьшаться (рассыщение). Возникает вопрос: «Как быстро можно позволить насыщаться ТК?» Бульман отвечает на этот вопрос с помощью «М-фактора». По-простому М-фактор это максимальнодопустимая разница между давлением в ТК и внешним давлением (различная для разных глубин и разных ТК). Превышение М-фактора, согласно Бульману, означает, что у вас не всё в порядке с головой, и вы нарываеетесь на неприятности. Таким образом, стратегия декомпрессии заключается в том, чтобы всплывать до тех пор, пока один из ТК не достигнет уровня М-Фактора, затем остановиться и дать ТК некоторое время для насыщения, затем всплыть ещё немного и т.д. В этом случае всплывая, вы не даёте внутреннему давлению газа в ТК превысить Бульмановский М-фактор. К сожалению, декомпрессионная болезнь не строго определяется Бульмановским М-фактором. Она чаще появляется, если дайвер превысил М-фактор, но иногда (хотя и значительно реже) возникает, если М-фактор даже не был достигнут.

Введение в Градиент-фактор.

Градиент-фактор (ГФ) был введён для того, чтобы дать дайверам возможность выбора, как близко к Бульмановскому М-фактору могут подойти их ТК. Градиент-фактор рассчитывается по следующей формуле:

GradientFactor= (Tissue Compartment Pressure - Ambient Pressure) / (MValve - Ambient Pressure)

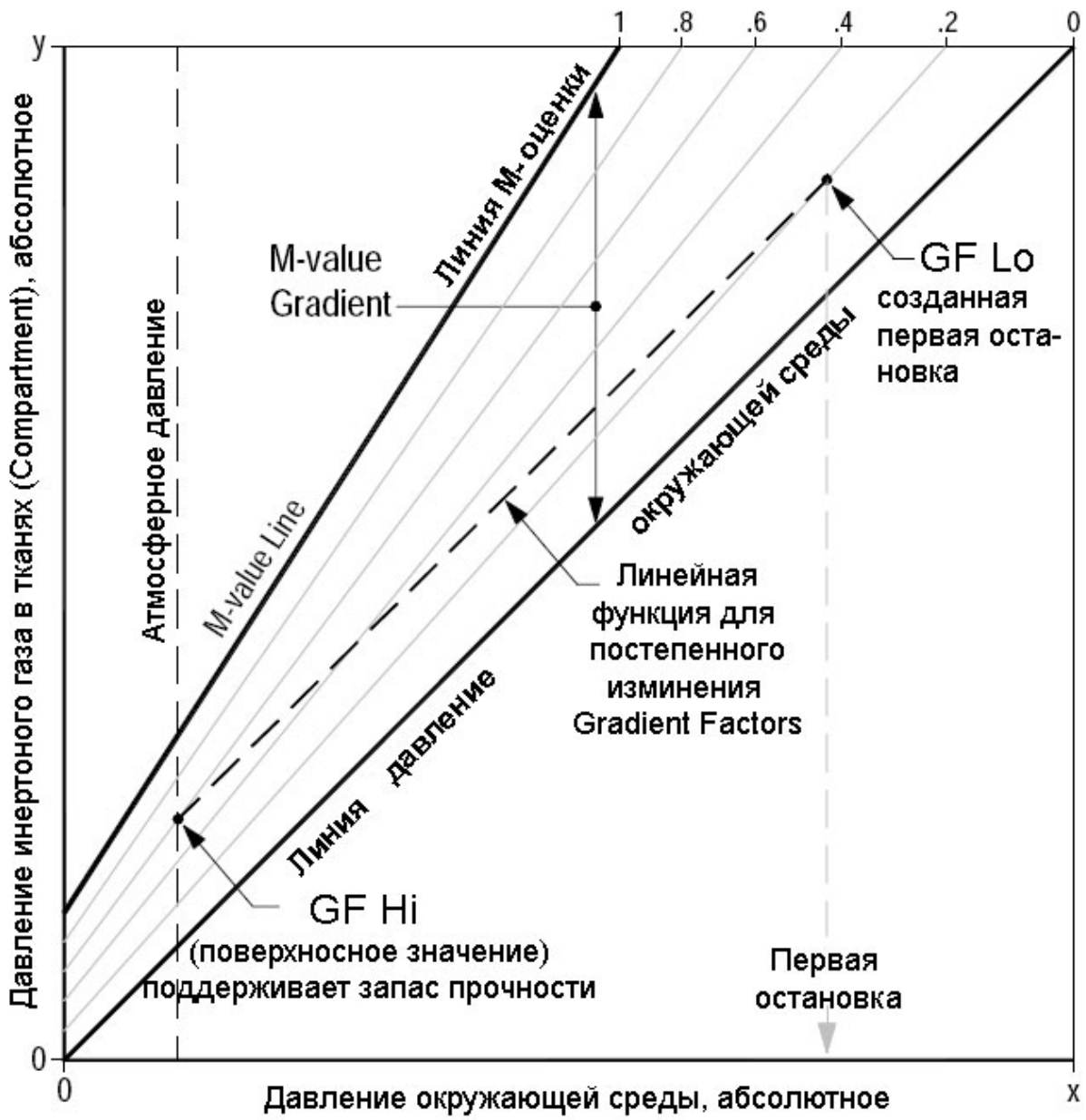
О чём говорит нам эта формула?

Во-первых, формула Градиент-фактора говорит нам, что если $ГФ=1.0$, то давление в ТК равно Бульмановскому М-фактору. Таким образом, важно, чтобы значение ГФ не превышало $ГФ=1.0$. Во-вторых, если давление в тканевых компартментах будет равно внешнему давлению, то $ГФ=0.0$. Другой стратегией декомпрессии может быть установление предела $ГФ=0.8$ и всплывать так, чтобы не превышать его. В этом случае, вы знаете, что давление в тканевых ячейках не превысит внешне больше, чем на величину в 80% от Бульмановского М-фактора. В этом случае у вас всегда будет запас безопасности в 20% от Бульмановского М-фактора. Декомпрессионные компьютеры, использующие ГФ, обычно дают возможность ввести для него два параметра. Если вы решили всплывать, используя постоянную величину $ГФ=0.8$, то это равносильно введению в декомпрессионный компьютер параметров 80/80.

Стратегия Эрика Бейкера

Эрик Бейкер не приветствует всплытие близкое к Бульмановскому М-фактору ($ГФ=1.0$). Вместо этого он предлагает начинать всплытие при низком значении ГФ, а затем медленно его увеличивать. Смотрите график.

График Давления: Gradient Factors



Гради
десятич
о

Градиен
ме

$0 \leq G$

Гради
линию д

Гради
ли

Фак
консер
уравн
Д

Нижне
(GF Lo
остановк
"Г