

ПОВЫШЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ АЗОТНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ  
И ТЕМПЕРАТУРА ЖИВОТНЫХ

Ю.И. ЛУЧАКОВ\*, А.И. ВЁТОШ\*\*, А.А. НЕСМЕЯНОВ\*\*\*

\*Институт физиологии им. И.П.Павлова, наб. Макарова, 6, Санкт-Петербург, Россия, 199034

\*\*Институт эволюционной физиологии им. М.И.Сеченова,  
пр. Тореза, 44, Санкт-Петербург, Россия, 194223

\*\*\*Тульский государственный университет, пр-т Ленина, 92, Тула, Россия, 300028

**Аннотация.** В работе проведены исследования терморегуляции крыс при повышенном давлении в дыхательно-газовой среде, как экспериментально, так и на математической модели. Эксперименты проведены на крысах в барокамере, где давление газовой среды поднимали до 4.1 МПа. Повышение давления в барокамере до 2.1 МПа приводило к увеличению потребления кислородом в 1.7 раза, а при давлении 4.1 МПа происходило увеличение потребления кислорода уже в 2.3 раза. Термонейтральная зона животных, наоборот, прогрессивно уменьшалась с ростом давления в барокамере. Используя математическую модель, было показано, что увеличение давления в барокамере до 2.1 МПа приводило к увеличению теплоотдачи в 1.9 раза, а увеличение давления в барокамере до 4.1 МПа увеличивало теплоотдачу с тела организма в окружающую среду в 2.6 раза.

**Ключевые слова:** температура, давление, крыса, барокамера, математическая модель.

INCREASED PRESSURE OF NITROGEN-OXYGEN MIXTURE AND THE TEMPERATURE  
IN ANIMALS

Yu. I. LUTCHAKOV\*, A.I. VETOSH\*\*, A.A. NESMEYANOV\*\*\*

\*Institute of Physiology. Pavlov, nab. Makarova, 6, St. Petersburg, Russia, 199034

\*\*Institute of Evolutionary Physiology them. M.I. Sechenova,  
pr. Torez, 44, St. Petersburg, Russia, 194223

\*\*\*Tula gosudarstvenny University, Lenin Prospect, 92, Tula, Russia, 300028

**Abstract.** The work is devoted to the study of thermoregulation of rats under high pressure in the respiratory-gas medium, both experimentally and in mathematical models. Experiments conducted on rats in a hyperbaric chamber, where the pressure of the gas medium was raised to 4,1 MPa. The pressure increase in the hyperbaric chamber up to 2,1 MPa leads to augmentation of oxygen consumption by 1.7 times and at a pressure of 4.1 MPa – to oxygen consumption by 2,3 times. Thermo-neutral zone in animals, on the contrary, is progressively decreased with increasing pressure in the hyperbaric chamber. Using a mathematical model, it has been shown that the augmentation of pressure in the hyperbaric chamber to 2,1 MPa leads to increase the heat transfer in 1,9 times. The augmentation of pressure in the hyperbaric chamber to 4,1 MPa increases the heat transfer from the organism body in the medium in 2,6 times.

**Key words:** temperature, pressure, rat, hyperbaric chamber, mathematical model.

Особая ситуация в проблеме терморегуляции складывается при повышенном давлении дыхательно-газовой среды. Одним из важнейших факторов, ограничивающих пребывание человека и животных в условиях повышенного давления, является изменение теплообмена между организмом и средой [6, 13]. Прежде всего? это касается интенсивности теплопродукции и теплоотдачи [5, 10]. При повышенном давлении дыхательно-газовой среды увеличивается теплоотдача и терморегуляция организма изменяется по сравнению с терморегуляцией в норме [1]. В настоящее время закономерности поддержания температуры тела при повышенном давлении гомойотермными животными и человеком от температуры среды не изучена, что обусловлено большими методическими трудностями проведения гипербарических исследований. Поэтому для изучения закономерности поддержания температуры тела при повышенном давлении были проведены настоящие исследования.

**Материалы и методы исследования.** Эксперименты проводили на 44 крысах-самцах (*Wistar*, массой 240-310 г). В первой серии опытов животных помещали в барокамеру объёмом 107 л. для измерения потребления кислорода в условиях различных температур и давлений нормоксической азотно-кислородной *дыхательно-газовой среде* (ДГС). Компрессия азотом проводилась со скоростью 0,1 МПа/мин. до давлений 2,1 и 4,1 МПа. Газовый анализ проводили с помощью анализаторов на  $O_2$  и

**Библиографическая ссылка:**

Лучаков Ю.И., Вётош А.И., Несмеянов А.А. Повышенное давление азотно-кислородной смеси и температура животных // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4. Публикация 2-8. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-4/5272.pdf> (дата обращения: 30.11.2015). DOI: 10.12737/16375

$CO_2$  типа SF-101 и SF-102 фирмы “SFAE”. Содержание углекислого газа в камере не превышало 0,00042 МПа. Температуру ДГС измеряли электротермометрами типа ТСМ-2.

Во второй серии опытов крыс в свободном поведении, а также в специальных пеналах, позволяющих животным сохранять обычную позу, но ограничивающих подвижность, помещали в барокамеру объёмом 15 литров.

У части животных регистрировали электрокардиограмму в отведении грудь-спина и дыхательную активность механоэлектрическим датчиком. Двигательную активность и рефлекс позы животных анализировали с применением актограмм и видеосъёмки. Температура ДГС могла изменяться в пределах 20-40°C. Неравномерность температурного поля в барокамере составляла  $\pm 0,5^\circ C$ . В ходе компрессии азотом вплоть до 12,1 МПа содержание кислорода в барокамере изменялось в пределах 0,0208-0,0426 МПа. Остальные параметры и условия опытов были аналогичны применявшимся в первой серии. Статистическую обработку полученных данных выполняли с применением *t*-критерия Стьюдента. Математические исследования проводились на математической модели цилиндра-крысы приводимой выше.

Исследование закономерностей теплорегуляции гомойотермного организма представляет сложную задачу, для практического решения которой неизбежны определенные допущения, позволяющие, прежде всего, упростить объект исследования. Для анализа теплообмена организма со средой нами была выбрана тепловая модель животных в виде цилиндра (рис. 1). Представление тепловой модели гомойотермного организма в виде цилиндр-животное в целом вполне адекватно имитирует теплообмен реального животного с окружающей его средой [11, 12, 14]. Теплофизическая модель животных в виде цилиндров учитывает основные параметры организма, которые определяют его теплообмен со средой – это тепловые параметры теплопереноса внутри организма, параметры теплопродукции и теплоотдачи, весовые параметры и т.д.

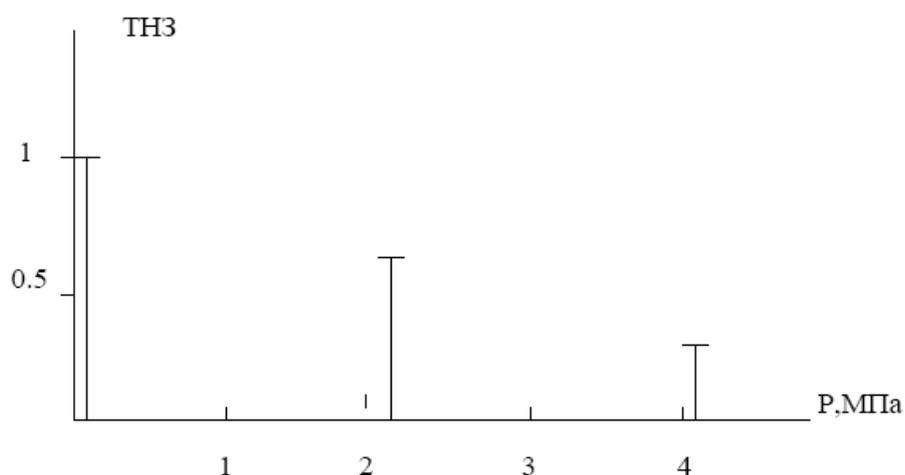


Рис. 1. Относительные изменения ТНЗ (величина ТНЗ в норме взята равной 1) в зависимости от давления в дыхательной газовой смеси

При рассмотрении теплообмена организма со средой важным моментом в нашей тепловой модели является учет не только процессов теплопродукции и теплоотдачи со средой, но и учет процесса теплопереноса в самом организме. В соответствии с нашими исследованиями [3, 4] в теле гомойотермного организма можно выделить внутреннюю область (ядро организма) и внешнюю (оболочка организма). В ядре существует интенсивный кровоток и поэтому теплоперенос осуществляется в основном конвективным образом, что и обеспечивает более или менее постоянную температуру этих тканей. В оболочке кровоток в нормальных условиях слабый и теплоперенос в основном осуществляется кондуктивным образом, что приводит в тканях этой области к резкому изменению температуры.

В нашей тепловой модели цилиндр-животное выделены два кооксальных цилиндра (рис. 1). Внутренний цилиндр – это область, которая имитирует ткани ядра организма, область между внутренним и внешним цилиндром, имитирует ткани оболочки. Благодаря такому представлению теплопереноса внутри организма, сам теплообмен организма со средой возможно представить в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

**Библиографическая ссылка:**

Лучаков Ю.И., Вётош А.И., Несмеянов А.А. Повышенное давление азотно-кислородной смеси и температура животных // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4. Публикация 2-8. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-4/5272.pdf> (дата обращения: 30.11.2015). DOI: 10.12737/16375

$$T_1 = Const$$

$$\lambda \times \left\{ \frac{d^2 T_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \times \frac{dT_2}{dr} \right\} + q_2 = 0$$

$$-\lambda \times \frac{dT_2}{dr} \Big|_{r_1} = \alpha \times (T_2 - T_{cp})$$

$$Q_1 = -\lambda \times S \times \frac{dT_2}{dr}$$

Решение этой системы уравнений возможно представить в виде алгебраической системы

$$T_1 = const$$

$$T_2 = \frac{q_2}{4 \times \lambda} \times (R_2^2 - r^2) + C_1 \times L \times \left( \frac{r}{R_2} \right) - \frac{\lambda}{\alpha} \times \left( \frac{q_2}{2 \times \lambda} \times R_2 - \frac{C_1}{R_2} \right) + T_{cp}$$

$$C_1 = \frac{q_2}{2 \times \lambda} \times R_1 - \frac{Q_1}{\lambda \times S}$$

где  $T_1, T_2$  – температура ядра, оболочки, соответственно;  $T_{cp}$  – температура среды;  $R_1, R_2$  – радиус внутреннего и внешнего цилиндра, соответственно;  $\lambda, \alpha$  – коэффициенты теплопроводности тканей в оболочке и коэффициент теплоотдачи с поверхности цилиндр-животное;  $Q_1$  – теплопродукция тканей ядра;  $L$  – длина цилиндра-животного.

**Результаты и их обсуждение.** Экспериментальная зависимость ширины термонейтральной зоны от внешнего давления представлена на рис.1. Как видно из рисунка, с увеличением давления ДГС пропорционально уменьшается и ширина термонейтральной зоны, которая при давлении 4.1 МПа уменьшается в 2.5 раза по сравнению с нормой. Потребление кислорода крысами, как видно из рисунка 2, наоборот, увеличивается с ростом давления. В соответствии с рисунком 2 при давлении 4.1 МПа потребление кислорода животными увеличивается в 2.3 раза по сравнению с нормой.

Такие изменения тепловых параметров обусловлены изменением свойств газовой среды. Увеличение давления в ДГС ведет к увеличению плотности газовой среды в камере, где находились животные. Более плотная окружающая газовая среда изменяет процесс теплоотдачи с тела животного. Кроме того, увеличивается теплоотдача с дыханием у животных. В этих условиях увеличенная теплоотдача должна была бы приводить к уменьшению температуры тела животного. Однако, как следует из наших экспериментов, температура тела животных не изменяется, а увеличивается их теплопродукция. Конечно, для анализа процесса теплообмена организма животного с газовой средой при повышенном давлении ДГС важно определение величины теплоотдачи. Воспользоваться способами определения этого параметра по приближительным формулам [8, 13] в нашем случае невозможно из-за наличия конвективного потока газа в барокамере при перемешивании газовой смеси с помощью вентилятора. Поэтому в работе использовано сочетание данных экспериментов и возможностей математического моделирования для определения изменения теплоотдачи. Эксперименты показали, что при увеличении давления внешней среды с 0.08 до 2.1 МПа в пределах термонейтральной зоны потребление кислорода животными увеличивалось с 1.1 до 1.7 л/кг в 1 час. Если в модели учитывать подобное увеличение потребления кислорода, то температура тела животного останется на прежнем уровне только при условии увеличения коэффициента теплоотдачи в 1.9 раза. Дальнейшее повышение давления кислородно-азотной дыхательной смеси до 4.1 МПа, как видно из рис. 2, приводит к еще большему увеличению потребления кислорода крысами до уровня 2.3 л/кг в 1 час в пределах термонейтральной зоны. Модельные расчеты показывают, что при таких условиях температура ядра тела остается неизменной только в том случае, если теплопотери организма крысы увеличатся в 2.6 раза.

Полученные данные позволяют предсказать на моделях температуру тела животных при повышенном давлении в ДГС без увеличения теплопродукции. Так, по нашим расчетам на модели увеличение давления в ДГС с 0.08 до 2.1 МПа приводило бы к тому, что температура животных снижалась бы с 37.5 до 34 °С, даже при температуре ДГС до 30 °С. Дальнейшее повышение давления в ДГС без повышения теплопродукции организма приводило бы к еще большему снижению температуры тела животных. По нашим расчетам на модели, увеличение давления в ДГС до 4.1 МПа без повышения теплопродукции приводило бы к понижению температуры тела животного до 32.6 °С, даже если температура в ДГС составляла бы 30 °С.

Как следует из рис. 2, наряду с увеличением давления в ДГС одновременно сокращается термонейтральная зона, что тоже определяется увеличенной теплоотдачей в среду. Если экстраполировать наши данные на еще большую величину давления ДГС, то термонейтральная зона сокращается до минимума. Еще большие давления в ДГС, по нашим представлениям приведет, приводят почти к выравниванию температуры тела и температуры в ДГС.

**Библиографическая ссылка:**

Лучаков Ю.И., Вётош А.И., Несмеянов А.А. Повышенное давление азотно-кислородной смеси и температура животных // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4. Публикация 2-8. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-4/5272.pdf> (дата обращения: 30.11.2015). DOI: 10.12737/16375

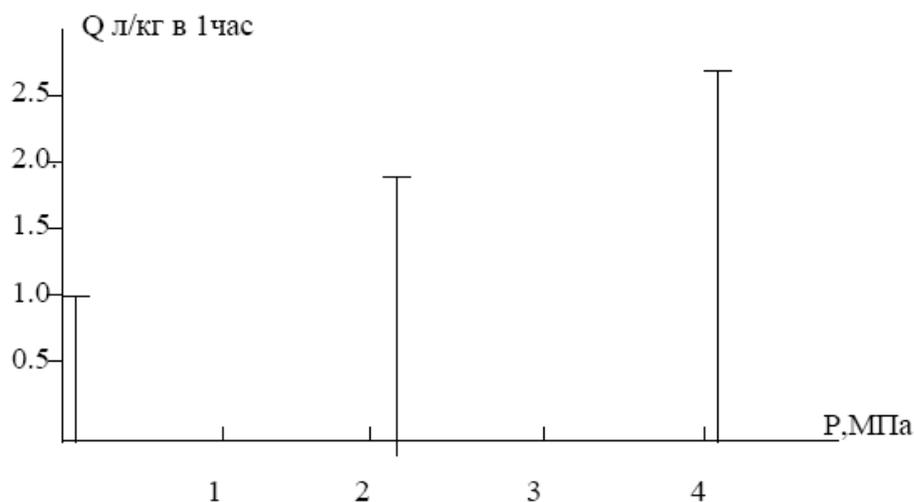


Рис. 2. Относительные изменения потребления кислорода (Q) (величина Q в норме взята равной 1) в зависимости от давления в дыхательной газовой смеси

С другой стороны, исходя из наших данных, понижение давления в ДГС может приводить во первых, к понижению теплопродукции организма, во вторых, к расширению термонеutralной зоны. Поэтому животные могут иметь физиологически нормальные параметры (поддерживать нормальную температуру тела) в более холодных условиях, и кроме того иметь сниженную теплопродукцию. В настоящее время хорошо известна зависимость интенсивности потребления кислорода от массы животного организма, по которой, чем меньше животное, тем больше величина обмена организма животного [2, 9]. С другой стороны по данным [7], чем меньше потребление кислорода у животного на единицу массы, тем более продолжителен период жизни его.

Таким образом, пониженное давление в ДГС возможно использовать в терапевтических целях для увеличения продолжительности жизни. Возможно, что у горцев, у которых продолжительность жизни значительно выше, чем у людей на равнине обусловлена тем, что у них снижен метаболизм. Полученные данные возможно использовать в спорте, так как увеличение потребления кислорода организмом приводит к увеличению интенсивности работы скелетными мышцами.

### Литература

1. Вётош А.Н. Биологическое действие азота. СПб, 2003, 231 с.
2. Иванов К.П. Основы Энергетики организма. Ленинград: Наука, 1990. 307 с.
3. Лучаков Ю. И., Антонов В.И., Осипенко Г.С., Ястребов А.В. Математическое моделирование теплопереноса в коже // Tools for mathematical modeling. 1999. V.5. P. 200–207.
4. Лучаков Ю. И., Морозов Г. Б. Математическое моделирование теплообмена организма с внешней средой. СПб, 2001. P. 226–229.
5. Стерликов А.В. Особенности теплообмена человека в условиях повышенного давления газовой среды и под водой. Действие гипербарической среды на организм человека и животных. М.: Наука, 1980.
6. Трошихин Г.В. Организм в гелио-кислородной среды. Л.: Наука, 1989. 157 с.
7. Флиндт Р. Биология в цифрах. Мир, 1992. 303 с.
8. Уэбб П. Тепловые проблемы подводных погружений. Медицинские проблемы подводных погружений. М., 1988. 321–359 с.
9. Шмидт-Нильсон К. Физиология животных. М., 1982.
10. Eckert R., Randall D., Augustine G. Animal Physiology. New York, 1988.
11. Fiala D, Lomas K. J., Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions // Int. J. Biometeorol. 2001. V.45. P. 143–159.
12. Lichenbelt W.D.M., Frijns A.J.H., Ooijen M.J., Fiala D., Kester M. and Steenhoven A.A. Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air // Int. J. Biometeorology. 2001. V.51, №3. P.169–179.
13. Sterba J. Thermal problems :prevention and treatment // The physiology medicine of diving. London. 1993. 301–341.
14. Werner J., Webb P. A six-cylinder model of the human thermoregulation for general use on personal computers // Ann. Physiol. Anthropol. 1993. V.12. P. 123–134.

### Библиографическая ссылка:

Лучаков Ю.И., Вётош А.И., Несмеянов А.А. Повышенное давление азотно-кислородной смеси и температура животных // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4. Публикация 2-8. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-4/5272.pdf> (дата обращения: 30.11.2015). DOI: 10.12737/16375

References

1. Vetosh AN. Biologicheskoe deystvie azota. SPb; 2003. Russian.
2. Ivanov KP. Osnovy Energetiki organizma. Leningrad: Nauka; 1990. Russian.
3. Luchakov YuI, Antonov VI, Osipenko GS, Yastrebov AV. Matematicheskoe modelirovanie teploperenosa v kozhe. Tools for mathematical modeling. 1999;5:200-7. Russian.
4. Luchakov YuI, Morozov GB. Matematicheskoe modelirovanie teploobmena organizma s vneshney sredoy. SPb; 2001. Russian.
5. Sterlikov AV. Osobennosti teploobmena cheloveka v usloviyakh povyshennogo davleniya gazovoy sredy i pod vodoy. Deystvie giperbaricheskoy sredy na organizm cheloveka i zivotnykh. Moscow: Nauka; 1980. Russian.
6. Troshikhin GV. Organizm v gelio-kislorodnoy sredy. L.: Nauka; 1989. Russian.
7. Flindt R. Biologiya v tsifrah. Mir; 1992. Russian.
8. Uebb P. Teplovye problemy podvodnykh pogruzheniy. Meditsinskie problemy podvodnykh pogruzheniy. Moscow; 1988. Russian.
9. Shmidt-Niel'son K. Fiziologiya zivotnykh. Mosco; 1982. Russian.
10. Eckert R, Randall D, Augustine G. Animal Physiology. New York; 1988.
11. Fiala D, Lomas KJ, Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. Int. J. Biometeorol. 2001;45:143-59.
12. Lichenbelt WDM, Frijns AJH, Ooijen MJ, Fiala D, Kester M, Steenhoven AA. Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air. Int. J. Biometeorology. 2001;51(3):169-79.
13. Sterba J. Thermal problems :prevention and treatment. The physiology medicine of diving. London. 1993. 301–341.
14. Werner J, Webb P. A six–cylinder model of the human thermoregulation for general use on personal computers. Ann. Physiol. Anthropol. 1993;12:123-34.

---

**Библиографическая ссылка:**

Лучаков Ю.И., Вётош А.И., Несмеянов А.А. Повышенное давление азотно-кислородной смеси и температура животных // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4. Публикация 2-8. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-4/5272.pdf> (дата обращения: 30.11.2015). DOI: 10.12737/16375