

УДК 613.693

© Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Матюшев Т.В.
Dvornikov M., Kukushkin Yu., Bogomolov A., Matyushev T.

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫМИ СИСТЕМАМИ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО РИСКА ГИПОКСИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА

SYNTHESIS TECHNOLOGY CONTROL LAWS OF MAN-MACHINE SYSTEMS OPERATING IN HIGH-RISK HUMAN HYPOXIC CONDITIONS

Аннотация. Изложено математическое обеспечение синтеза законов управления человеко-машинными системами, эксплуатируемыми в условиях высокого риска гипоксических состояний человека, основанное на результатах моделирования динамики гипоксических состояний человека.

Работа поддержана РФФИ, грант 12-08-01273-а.

Annotation. It examines the software synthesis of control laws of man-machine systems operating in high-risk human hypoxic conditions, based on the results of the simulation of the dynamics of hypoxic states rights.

This work was supported by RFBR grant 12-08-01273-a.

Ключевые слова. Управление человеко-машинными системами, рискометрия здоровья, моделирование опасных состояний человека.

Key words. Management of human-machine systems, riskometriya health, bazard modeling states rights.

Ситуации, связанные с быстротекущим воздействием на человека среды с малым содержанием кислорода в окружающем воздухе, приводят к развитию у человека гипоксических состояний (состояний кислородного голодания как всего организма в целом, так и отдельных органов и тканей), обуславливающих высокий риск потери сознания человеком и даже его гибели [1 - 4]. Это обуславливает необходимость реализации в человеко-машинных комплексах, эксплуатирующихся в таких условиях (пилотируемые космические корабли, самолеты и вертолеты, технические средства, эксплуатируемые в высокогорье и др.), систем жизнеобеспечения жизнедеятельности, систем жизнеобеспечения и защитного снаряжения челове-

ка, для чего необходим специальный инструментарий по обоснованию их рациональных характеристик, основой которого являются математические модели диагностики и управления состоянием человека в таких условиях. Отсюда же следует необходимость учёта при разработке законов управления человеко-машинными системами, эксплуатируемыми в условиях гипоксической гипоксии, состояния оператора.

Решение такой задачи требует оценок риска потери сознания человека в условиях гипоксии, что требует оценок перечисленных параметров с учетом влияния изменяемой гипоксической среды на организм человека. Известные математические модели [1, 2] позволяют про-

Дворников Михаил Вячеславович – доктор медицинских наук, профессор, начальник отдела, НИИЦ авиационно-космической медицины и военной эргономики, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России», тел. (495)612-80-31;

Кукушкин Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, НИИЦ авиационно-космической медицины и военной эргономики, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России»;

Богомолов Алексей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, НИИЦ авиационно-космической медицины и военной эргономики, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России»;

Матюшев Тимофей Викторович – доктор биологических наук, начальник лаборатории, НИИЦ авиационно-космической медицины и военной эргономики, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России».

Dvornikov Michael – MD, professor, head of department, NIITS aerospace medicine and military ergonomics, the FBI "4 CRI Russian Defense Ministry", tel. (495) 612-80-31;

Kukushkin Yuri – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, NIITS aerospace medicine and military ergonomics, the FBI "4 CRI Defense of Russia";

Bogomolov Alexei – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, NIITS aerospace medicine and military ergonomics, the FBI "4 CRI Defense of Russia";

Matyushev Timothy – doctor of biological sciences, head of laboratory, NIITS aerospace medicine and military ergonomics, the FBI "4 CRI Russian Ministry of Defense."

изводить такую оценку в статических условиях, то есть при сохранении постоянства интенсивности гипоксического воздействия в течение анализируемого интервала времени, что существенно ограничивает область их применения. Преодолеть указанный недостаток можно за счет разработки новых теоретических подходов к нормированию воздействия гипоксической газовой среды на организм человека и моделирования гипоксических состояний, базирующихся на дозовом принципе.

Математическая модель динамики гипоксических состояний

Аналитически «доза гипоксии» определяется выражением

$$D(t) = \int_0^t [p_{6500}^m - p^m(t)] dt,$$

где $D(t)$ – экспозиционная доза гипоксического воздействия;

$p_{6500}^m = 37,8$ кПа – парциальное давление кислорода в трахее при значении барометрического давления 44 кПа (соответствует высоте над уровнем моря 6,5 км);

$p^m(t)$ – текущее значение парциального давления кислорода в трахее;

T – интервал интегрирования.

Парциальное давление кислорода в трахее связано с барометрическим давлением зависимостью

$$p^m = F(p - p_{H_2O}),$$

где F – относительная концентрация кислорода в атмосфере ($F = 0,21$);

p – барометрическое давление;

p_{H_2O} – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре 310°K (37°С), равное 6,27 кПа (47 мм рт.ст.).

При численном интегрировании выражение для дозы гипоксии можно записать в виде

$$D_s = \sum_{i=1}^n [p_0^m - p^m(t_i)] \Delta t,$$

где $t_i = i \Delta t$.

Разность $p_{6500}^m - p^m(t)$ определена нами как интенсивность гипоксического воздействия U .

В высотной физиологии [1–3, 5–7] получены эмпирические результаты, позволяющие рассчитать оценки минимального T_{min}^{nc} , среднего T_{mean}^{nc} , и максимального T_{max}^{nc} резервного времени потери сознания при пребывании человека на различных высотах (при различном барометрическом давлении).

По этим данным методом Левенберга-Марквардта (Levenberg–Marquardt) синтезированы регрессионные уравнения, описывающие зависимости времени потери сознания от интенсивности гипоксического воздействия.

Эти уравнения имеют следующий вид:

$$T_{min}^{nc} = 186,15U^{-1,0003}; T_{mean}^{nc} = 367,23U^{-1,0008}; T_{max}^{nc} = 710,37U^{-1,1557}.$$

Статистическая значимость синтезированных уравнений по критерию Фишера соответствует уровню значимости $p < 0,001$.

С учетом результатов структурной идентификации законов распределения резервного времени потери сознания получены аналитические выражения для расчёта оценок вероятностей потери сознания W_U^{nc} в зависимости от времени t пребывания в гипоксической газовой среде, интенсивность которой постоянна, т.е. $U = const$

$$W_U^{nc}(t) = \begin{cases} 0,5 - \Phi \left[\frac{3,224 \langle t_i - T_{i mean}^{nc}(U) \rangle}{T_{i mean}^{nc}(U) - T_{i min}^{nc}(U)} \right], & \text{если } t_i - T_{i mean}^{nc}(U) \leq 0; \\ 0,5 + \Phi \left[\frac{3,224 \langle t_i - T_{i mean}^{nc}(U) \rangle}{T_{i max}^{nc}(U) - T_{i mean}^{nc}(U)} \right], & \text{если } t_i - T_{i mean}^{nc}(U) > 0, \end{cases}$$

где Φ – функция Лапласа.

Параметры этой модели определены при соблюдении условия постоянства барометрического давления в течение всего времени пребывания человека в газовой среде, что затрудняет ее использование применительно к динамическим условиям. Однако дозовый подход позволяет преодолеть эти трудности за счет того, что, определив в соответствии дозу гипоксии при изменении p^m и разделив ее значение на время измерения, вычисляется величина

$$\Delta P_s^m = D_s / \sum_{i=1}^n i \Delta t,$$

эквивалентная полученной дозе гипоксии при соблюдении условия постоянства парциального давления кислорода в трахее (полета на постоянной высоте), а следовательно, и однозначно связанных с ним барометрическим давлением и высотой над уровнем моря. Тогда эквивалентная дозе величина парциального давления кислорода в трахее равна

$$P_s^m = \Delta P_s^m + P_0^m.$$

Эта величина используется для динамических расчетов параметров T_{min}^{nc} , T_{mean}^{nc} , T_{max}^{nc} . Определив значения этих параметров и зная текущее время $t_i = i \Delta t$, рассчитываются оценки вероятностей потери сознания.

Коэффициенты выражений, аппроксимирующих зависимости T_{min}^{nc} , T_{mean}^{nc} и T_{max}^{nc} от U , равны дозам, соответствующим указанным временам переносимости гипоксического воздействия. С учетом этих значений получена модель, позволяющая определять вероятность потери сознания в зависимости от дозы гипоксии в произволь-

ный момент времени t_i [3, 6-10]

$$W_U^{nc}(t) = \begin{cases} 0,5 - \Phi \left[\frac{3,224 \left\langle \sum_{i=1}^n U(t_i) \Delta t - 367,23 \right\rangle}{181,01} \right], \\ \text{если } \sum_{i=1}^n U(t_i) \Delta t - 367,23 \leq 0; \\ 0,5 + \Phi \left[\frac{3,224 \left\langle \sum_{i=1}^n U(t_i)^\alpha \Delta t - 367,23 \right\rangle}{343,14} \right], \\ \text{если } \sum_{i=1}^n U(t_i)^\alpha \Delta t - 367,23 > 0, \end{cases}$$

где $\sum_{i=1}^n U(t_i) \Delta t$ – текущее значение дозы гипоксии в момент времени t_i ;

Δt – интервал времени, через который производится определение дозы;

n – количество измерений дозы;

$$\alpha = 1 + 0,000454 \sum_{i=1}^n U(t_i) \Delta t - 367,23.$$

Методология дозового подхода и реализующее её математическое обеспечение позволяют рассчитать время сохранения работоспособности человека в условиях гипоксической гипоксии и её восстановления после потери сознания, обусловленной воздействием гипоксии. Моментом начала восстановления работоспособности человека является момент изменения знака дозы гипоксии, а моментом полного восстановления сознания – момент, при котором наступает равенство по модулю положительных и отрицательных доз гипоксии.

Предложенный метод обеспечивает расчет адекватных оценок вероятностей рассматриваемых неблагоприятных эффектов при любых значениях скоростей и профилей изменения парциального давления кислорода в трахее, кратности времени воздействия гипоксической среды.

Верификация математической модели на основе вычислительного эксперимента

Для верификации разработанной математической модели был проведен вычислительный эксперимент с использованием данных реального авиационного инцидента, происшедшего на самолете Ту-154 18.05.1998 года. Фабула происшествия изложена в публикации «Новой газеты» № 22(494) 1998 г. Кроме того, были использованы результаты расшифровки параметров изменения

высоты полета и высоты в салоне самолета в период от 1700 до 3000 с полета по данным средств объективного контроля, предоставленным специалистами Межгосударственного авиационного комитета.

В период от 1750 до 1800 с полета имело место превышение избыточного давления в гермокабине (более 0,56 кгс/см²), которое на 1830 с (30-й мин) сменилось резким (за 100 с) увеличением высоты в салоне (полной разгерметизации салона).

Экипаж изменил эшелон полета с 10000 до 8000 м, а затем до 7500 м. Полет на этой высоте продолжался в течение 510 с (8,5 мин). Затем самолет снизился до высоты 4000 м и после устранения разгерметизации кабины к 3800 с (64-й мин) полета был продолжен на высоте 9000 м и завершён на аэродроме назначения к 5700 с (95-й мин) полета.

Результаты расследования авиационного инцидента показали, что одним из членов экипажа была допущена ошибка – вместо переключения на резервный регулятор соотношения давления был включен тумблер «клапана выпускного» (типа Кл. 6894) для принудительной разгерметизации салона. Эта ошибка была распознана лишь через 12–14 мин. Экипаж весь этот период в соответствии с руководством по летной эксплуатации находился в кислородных масках.

Второй ошибкой экипажа явилось то, что самолет снизился лишь до высоты 8000–7500 м, а не до 4000 м, как положено в таких ситуациях. При этом пассажиры (52 человека) и стюарды (6 человек) находились в разгерметизированном салоне без дополнительного кислородного обеспечения (точка кислородного питания находилась только в помещении для стюардов).

Как свидетельствуют пассажиры и (неофициально) стюарды, практически все пассажиры в той или иной степени выраженности потеряли сознание. Однако за этот относительно непродолжительный период никто из пассажиров не погиб.

Традиционный вариант расчета риска потери сознания у пассажиров при постоянно изменяющейся высоте в салоне в течение 25 мин пребывания на высотах от 3000 до 8700 м не позволил дать даже ориентировочную оценку вероятности сохранения сознания, хотя суммарное время пребывания на высотах более 7500 м приближалось к максимально возможным значениям резервного времени.

Использование предлагаемого подхода при ретроспективной оценке инцидента позволило по предложенным математическим моделям рассчитать дозу гипоксического воздействия и получить количественную

оценку риска потери сознания.

Результаты расчета вероятности потери сознания людей (92%) хорошо согласуются с материалами расследования авиационного инцидента. Из 58 человек, находившихся в салоне без дополнительного кислородного обеспечения, только один сохранил относительную работоспособность и сумел воспользоваться кислородной маской. То есть фактически потеряли сознание 98% людей, находившихся в пассажирском салоне воздушного судна.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой достоверности получаемых при использовании разработанных на основе дозового принципа нормирования воздействия на человека гипоксической газовой среды математических моделей оценок риска снижения и утраты работоспособности человека в условиях выраженных степеней острого гипоксического состояния, прогнозных значений резервного времени наступления потери сознания и потребного времени устране-

ния дефицита кислорода при снижении воздушного судна до высоты, входящей в зону полной компенсации, что весьма важно для разработки систем жизнеобеспечения и систем обеспечения жизнедеятельности летательных аппаратов [1-10].

Математическая модель дозы гипоксии в виде интеграла интенсивности гипоксического воздействия в пределах времени действия этого фактора позволяет перейти в динамическую область исследования эффектов воздействия гипоксической газовой среды и оценивать её влияния на состояние человека при изменении интенсивности гипоксического воздействия во времени. Разработанный на основе математической модели метод расчёта риска потери работоспособности человеком в условиях низкого барометрического давления обеспечивает поддержку принятия решений при синтезе законов управления человеко-машинными системами, эксплуатируемыми в условиях высокого риска гипоксических состояний человека.

Литература

1. *Авиационная медицина.* / Под ред. Н.М.Рудного, П.В.Васильева, С.А.Гозулова. – М.: Медицина, 1986. – 578 с.
2. Ушаков И.Б. *Физиология высотного полета* / И.Б.Ушаков, И.Н.Черняков, А.А.Шишов – Воронеж: Истоки, 2008. – 147 с.
3. Кукушкин Ю.А. *Математическое обеспечение рискометрии состояний человека в экстремальных и аварийных ситуациях, сопряженных с гипоксическим воздействием* / Ю.А.Кукушкин [и др.] // *Безопасность жизнедеятельности.* 2012. № 10. С. 25 – 33.
4. Кукушкин Ю.А. *Методология стабилизации функционального состояния оператора системы «человек - машина»* / Ю.А.Кукушкин, А.Г.Гузий, А.В.Богомолов // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2002. №5. С. 17-20.
5. Кукушкин Ю.А. *Особенности поддержки принятия решений по устранению особых событий и опасных состояний летчика в высотном полете* / Ю.А.Кукушкин [и др.] // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.* 2009. № 6. С. 74-79.
6. Кукушкин Ю.А. *Методика определения потенциальной ненадёжности действий и резервного времени сохранения работоспособности лётчика в высотном полёте* / Ю.А.Кукушкин, М.В.Дворников, А.В.Богомолов и др. // *Проблемы безопасности полётов.* – 2002. – № 11. – С. 22 – 27.
7. Кукушкин Ю.А. *Метод расчёта риска потери работоспособности человеком в условиях низкого барометрического давления* / Ю.А. Кукушкин [и др.] // *Полет.* 2012. № 10.
8. Kukushkin YA. *Rhythmicardiogram approximation methods for calculation of spectral parameters of cardiac rhythm variability* / YA.Kukushkin, AV.Bogomolov, AI.Maistrov // *Biomedical Engineering.* 2010. T. 44. № 3. С. 92-103.
9. Федоров М.В. *Технология планирования многофакторных экспериментальных исследований и построения эмпирических моделей комбинированных воздействий факторов на операторов эргатических систем* / М.В.Федоров, А.В.Богомолов, Г.В.Цыганок, С.А.Айвазян // *Информационно-измерительные и управляющие системы.* – 2010. – № 5. – С. 53 – 61.
10. Ушаков И.Б. *Аппаратно-программные комплексы для медико-психологического обеспечения контроля надежности профессиональной деятельности человека в условиях высокого риска возникновения чрезвычайной ситуации* / И.Б.Ушаков, А.А.Ворона, Ю.А.Кукушкин, А.В.Богомолов // *Безопасность жизнедеятельности.* 2004. № 3. С. 8 - 14.

Материал поступил в редакцию 29. 12. 2013 г.