

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВОЗДУШНОГО КОМПРЕССОРА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕЗОТБОРНОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

**METHOD FOR DETERMINING THE DESIGN PARAMETERS OF A CENTRIFUGAL AIR COMPRESSOR BASED ON A MATHEMATICAL MODEL OF A NON-SELECTIVE AIR CONDITIONING SYSTEM**

**D. Smagin  
K. Starostin  
R. Savelyev  
K. Napreenko  
N. Vasiliev  
Ye. Krasavin**

*Summary:* The article considers a mathematical model of an air conditioning system for a promising medium-haul aircraft. The key feature of this system is the use of an electric centrifugal air compressor as a source of compressed air. The methodology for determining the design parameters of an air compressor based on the results of modeling the air conditioning system in several modes is shown.

*Keywords:* mathematical model, air conditioning system, centrifugal compressor, air cooling unit, air cycle, compression–evaporation cycle.

**Смагин Денис Игоревич**

Начальник лаборатории, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
79637587781@yandex.ru

**Старостин Константин Игоревич**

Ведущий инженер, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
ki-star1969@yandex.ru

**Савельев Роман Сергеевич**

Ведущий инженер, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
r\_sr@inbox.ru

**Напреенко Константин Сергеевич**

Инженер 2 категории, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
konaprko@yandex.ru

**Васильев Николай Георгиевич**

Техник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
col.vasiliev2012@yandex.ru

**Красавин Егор Эдуардович**

Техник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
krasavin.ieghor@mail.ru

*Аннотация:* В статье рассмотрена математическая модель системы кондиционирования воздуха для перспективного среднемагистрального самолёта. Ключевой особенностью данной системы является использование электроприводного центробежного воздушного компрессора в качестве источника сжатого воздуха. Показана методология определения проектных параметров воздушного компрессора по результатам моделирования системы кондиционирования на нескольких режимах.

*Ключевые слова:* математическая модель, система кондиционирования воздуха, центробежный компрессор, установка охлаждения воздуха, воздушный цикл, компрессионно–испарительный цикл.

## Введение

**В**настоящий момент наиболее перспективным витком развития авиационной промышленности является создание полностью электрического самолета, однако создание такого самолета невозможно без переходной модификации: более электрического самолета (БЭС). В таком самолете отсутствуют системы отбора воздуха от двигателя, который необходим для обеспечения работы системы кондиционирования воздуха (СКВ) и

противообледенительной системы (ПОС). Эти системы будут работать за счет электрогенераторов и аккумуляторов. В частности, электроэнергия будет подаваться на центробежный компрессор, который будет подавать воздух для СКВ.

На данный момент есть 2 возможных варианта исполнения установки охлаждения воздуха (УОВ): классический – установка охлаждения с воздушным циклом (УОВ с применением турбохолодильника), перспективная

– установка охлаждения с компрессионно-испарительным циклом (парокомпрессионная УОВ).

Системы подачи воздуха аналогичны для двух вариантов СКВ без отбора воздуха от двигателей и представляют собой электроприводной центробежный воздушный компрессор. Структура и состав системы распределения воздуха так же аналогичны [2] [3].

Установка охлаждения воздушного цикла (ВЦ) включает в себя:

- Теплообменники воздуховоздушные (первичный и вторичный);
- Схему влагоотделения в линии высокого давления (теплообменник-подогреватель, теплообменник-конденсатор, влагоотделитель);
- Турбохолодильник с одной ступенью турбины;
- Запорно-регулирующие устройства.
- Установка охлаждения компрессионно-испарительного цикла (ПКМ) включает в себя:
  - Теплообменник испаритель (воздух–фреон);
  - Теплообменник пре-конденсатор (фреон–воздух);
  - Теплообменник конденсатор (фреон–топливо);
  - Компрессор двухступенчатый фреоновый;
  - Запорно-регулирующие устройства.

Таким образом, в настоящей статье рассматривается возможность применения СКВ без отбора воздуха от двигателя, расчет потребной характеристики центробежного компрессора, сравнение двух вариантов исполнения УОВ и нахождение потребной электрической мощности для электромотора.

### Методология расчета

В качестве рассматриваемой СКВ была взята система из двух независимых линий с двумя центробежными компрессорами. Рассматриваемая схема работает в трех режимах: земля, переходный, крейсер, которые дают представление о условиях атмосферы за бортом самолета и необходимых условиях внутри гермокабины, которые должна обеспечивать СКВ. Параметры атмосферы за бортом и внутри гермокабины приведены в Таблице 1. Эти же параметры будут входными в компрессоры. Также система работает в 4 режимах нагрузки: минимальный (min), средний (med), максимальный (max) и форсированный (force). Каждый из режимов нагрузок представляет собой моделирование следующих ситуаций: min – обеспечение минимального потребного расхода подаваемого воздуха на трех режимах работы, med – обеспечение нормального расхода подаваемого воздуха на трех режимах работы, max – обеспечение максимального расхода воздуха на режимах максимальных тепло и холодопроизводительности (режимы работы земля и переходный), force – обеспечение минимального расхода воздуха при отказе одного из двух центробежных

компрессоров (оставшийся компрессор работает на две подсистемы(режим работы крейсерский)).

Таблица 1.

Режимы работы			
Режим	Tвх, °C	Pвх, Па	Pкаб, Па
Земля	20	101300	101300
Переходный	12	98082	83000
Крейсерский	-44	34248	83000

Расход является определяющей величиной. Поэтому характеристика центробежного компрессора определяется через потребные расходы (Таблица 2).

Таблица 2.

Потребные расходы	
Режим нагрузки	G, кг/ч
Min	1500
Med	1900
Max	2400
Force	3000

В свою очередь, каждый из режимов нагрузок определяет перепад давлений на следующих элементах: система подачи воздуха (СПВ), УОВ, канал. Перепад давлений на УОВ зависит от потребного расхода G и удельной холодопроизводительности УОВ. В свою очередь, удельная холодопроизводительность тоже зависит от потребного расхода и вычисляется по следующей формуле:

$$q = \frac{Q}{G},$$

где:

- q – удельная холодопроизводительность УОВ, Дж/кг;
- Q – полная холодопроизводительность УОВ, Дж/с;
- G – потребный расход, кг/с.

Практический холодильный коэффициент характеризует степень термодинамической эффективности реального цикла авиационной воздушно-холодильной машины с точки зрения энергетического баланса (первое начало термодинамики).

Также из-за рассмотрения двух типов УОВ перепады давлений на них будут отличаться. Результаты перепадов давлений в зависимости от режимов работы и режимов нагрузок представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Режимы нагрузок				
УОВ турбохолодильник				
Режим нагрузки	Режим работы	ΔP СПВ, Па	ΔP УОВ, Па	ΔP каналы, Па
Min	Земля	20006	120132	5006
	Переходный	20012	120186	5013
	Крейсерский	20018	120203	5027

УОВ турбохолодильник				
Режим нагрузки	Режим работы	ΔР СПВ, Па	ΔР УОВ, Па	ΔР каналы, Па
Med	Земля	20010	170157	5009
	Переходный	20015	170193	5018
	Крейсерский	20021	170214	5030
Max	Земля	20013	210182	5012
	Переходный	20019	210231	5036
Force	Крейсерский	22026	177618	5045

УОВ парокompрессионная				
Режим нагрузки	Режим работы	ΔР СПВ, Па	ΔР УОВ, Па	ΔР каналы, Па
Min	Земля	20005	13001	5003
	Переходный	20011	13009	5010
	Крейсерский	20015	13018	5023
Med	Земля	20008	15006	5004
	Переходный	20012	15017	5014
	Крейсерский	20019	15022	5026
Max	Земля	20011	17010	5016
	Переходный	20019	17019	5032
Force	Крейсерский	40023	26028	10015

**Математическая модель СКВ без отбора от силовой установки**

Данная схема была смоделирована в программе LMS Amesim (Рисунок 1). В данной схеме красным цветом выделена горячая линия, синим – холодная, желтым – линия после смешения воздуха, черным – блоки управления. В

данной модели было сделано следующее допущение: в электромотор поступает заранее преобразованный трехфазный переменный ток.

Таблица 4.

**Суммарные перепады давлений**

УОВ турбохолодильник		
Режим нагрузки	Режим работы	Р <sub>вых</sub> , Па
Min	Земля	246444
	Переходный	228211
	Крейсерский	228248
Med	Земля	296476
	Переходный	278226
	Крейсерский	278265
Max	Земля	336507
	Переходный	318286
Force	Крейсерский	287689

УОВ парокompрессионная		
Режим нагрузки	Режим работы	Р <sub>вых</sub> , Па
Min	Земля	139309
	Переходный	121030
	Крейсерский	121056
Med	Земля	141318
	Переходный	123043
	Крейсерский	123067
Max	Земля	143337
	Переходный	125070
Force	Крейсерский	159066

Потребное давление на выходе из центробежных

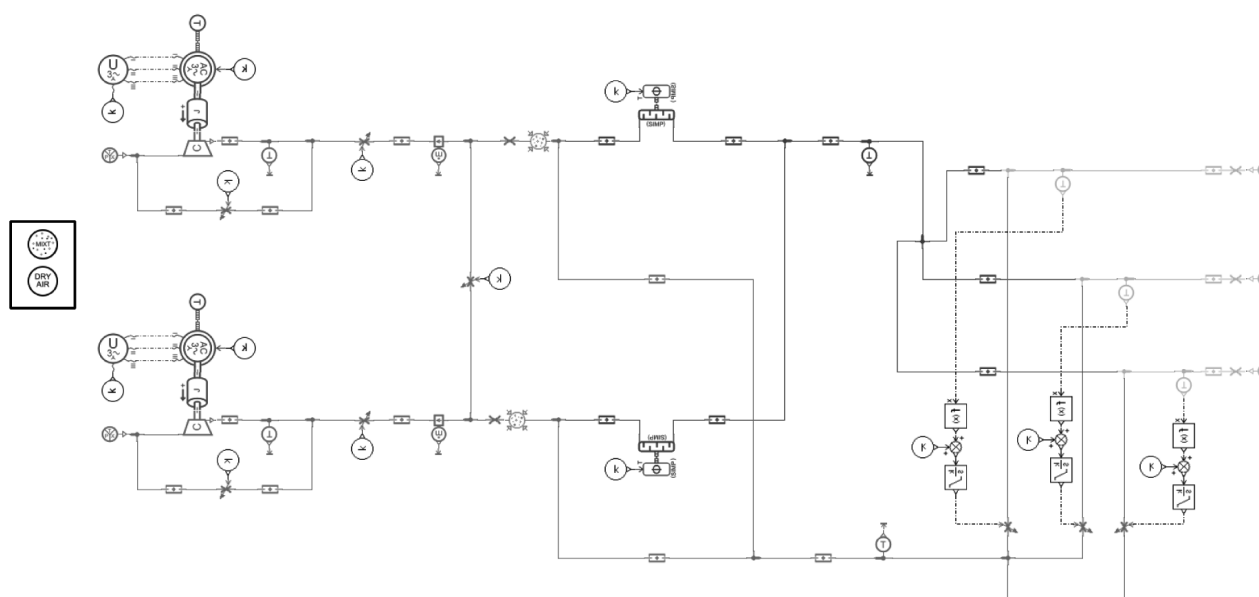


Рис. 1. Принципиальная схема в LMS Amesim

компрессоров можно представить как сумму всех перепадов давлений и давления в кабине (Р<sub>вых</sub>). Из вышесказанного следует, что суммарный перепад давления будет разным для турбохолодильной установки охлаждения и парокомпрессионной. Результаты вычислений приведены в Таблице 4.

Помимо этого, производится сравнительный анализ 2 типов УОВ: классический (турбохолодильник) и перспективный (парокомпрессионная холодильная машина).

Благодаря вышеуказанным данным, можно узнать степени сжатия для каждого режима и вида нагрузки установки охлаждения воздуха, которые вычисляются по следующей формуле:

$$\pi_k = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

где:

- $\pi_k$  – степень повышения давления в компрессоре,
- $P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из компрессора,
- $P_{\text{вх}}$  – давление на входе в компрессор.

Результаты вычислений степеней сжатия для каждого режима работы и нагрузок приведены в Таблице 5.

Таблица 5.

**Степени сжатия**

УОВ турбохолодильник		
Режим нагрузки	Режим работы	$\pi_k$
Min	Земля	2,4
	Переходный	2,3
	Крейсерский	6,6
Med	Земля	2,9
	Переходный	2,8
	Крейсерский	8,1
Max	Земля	3,3
	Переходный	3,2
Force	Крейсерский	8,4

УОВ парокомпрессионная		
Режим нагрузки	Режим работы	$\pi_k$
Min	Земля	1,3
	Переходный	1,2
	Крейсерский	3,5
Med	Земля	1,4
	Переходный	1,2
	Крейсерский	3,6
Max	Земля	1,4
	Переходный	1,2
Force	Крейсерский	4,4

Количество потребных оборотов зависит от входных параметров воздуха, которые зависят от режима работы, режимов нагрузок и потребного расхода, которое можно определить по следующей формуле:

$$N = \frac{G}{\rho(P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}})L'}$$

где:

$N$  – количество потребных оборотов, об/мин;

$G$  – потребный расход воздуха, кг/ч;

$\rho(P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}})$  – плотность воздуха на входе в компрессор в зависимости от давления и температуры воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$L'$  – перепускная способность центробежного компрессора л/об.

Результаты вычислений потребных оборотов показаны в Таблице 6.

Таблица 6.

**Потребные обороты компрессора**

Режим нагрузки	Режим работы	$N$ , об/мин
Min	Земля	7175
	Переходный	7410
	Крейсерский	21230
Med	Земля	9090
	Переходный	9385
	Крейсерский	26880
Max	Земля	11480
	Переходный	11857
Force	Крейсерский	42440

На основании полученных данных можно построить необходимую характеристику компрессора. На рисунке 2 показана характеристика предположительного центробежного компрессора, где красной линией показаны минимально допустимые значения компрессора при УОВ в варианте турбохолодильника, розовой – реальные значения компрессора при УОВ в варианте турбохолодильника, область между этими двумя кривыми – зона регулирования компрессора; черной линией показаны минимально допустимые значения компрессора при УОВ в варианте парокомпрессионной холодильной машины, синей – реальные значения компрессора при УОВ в варианте парокомпрессионной холодильной машины, область между этими двумя кривыми – зона регулирования компрессора.

Затем были получены значения выходной механической мощности электродвигателя в зависимости от режима работы и нагрузки (Таблица 7):

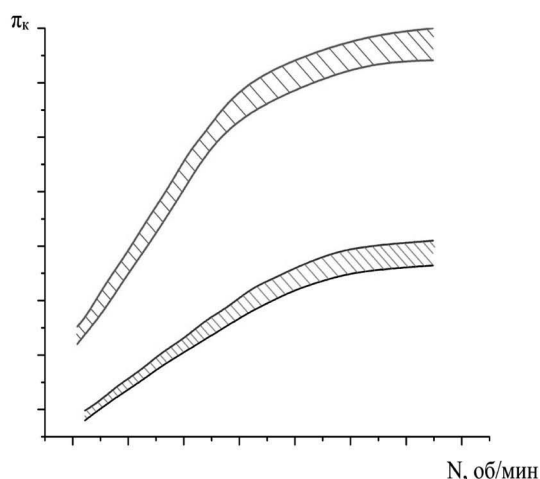


Рис. 2. Характеристика компрессора

Таблица 7.

Выходящая механическая мощность электромотора

Режим нагрузки	Режим работы	P, кВт
Min	Земля	19.77
	Переходный	22.318
	Крейсерский	122.24
Med	Земля	29.332
	Переходный	36.694
	Крейсерский	165.642
Max	Земля	41.888
	Переходный	41.891
Force	Крейсерский	342.674

Затем, на основании полученных данных, можно найти действующее значение переменного тока по следующей формуле:

$$I_{rms} = \frac{P}{3 * U_{rms}}$$

где:

$I_{rms}$  – действующее значение силы тока, А;

$P$  – выходящая механическая мощность электромотора, кВт;

$U_{rms}$  – среднеквадратичное напряжение, В.

Результаты вычислений приведены в таблице 8.

После этого можно найти значения полной мощности для каждого режима работы и нагрузки по следующей формуле:

$$S_{app} = 3 * U_{rms} * I_{rms},$$

где:

$S_{app}$  – полная мощность, кВт;

$U_{rms}$  – среднеквадратичное напряжение, В;

$I_{rms}$  – действующее значение силы тока, А.

Результаты вычислений приведены в таблице 9.

Таблица 8.

Действующее значение силы тока

Режим нагрузки	Режим работы	$I_{rms}$ , А
Min	Земля	57.302
	Переходный	64.689
	Крейсерский	354.32
Med	Земля	85.021
	Переходный	106.36
	Крейсерский	480.122
Max	Земля	121.416
	Переходный	121.422
Force	Крейсерский	993.258

Таблица 9.

Полная мощность электромотора

Режим нагрузки	Режим работы	$S_{app}$ , кВт
Min	Земля	19.77
	Переходный	22.318
	Крейсерский	122.24
Med	Земля	29.332
	Переходный	36.694
	Крейсерский	165.642
Max	Земля	41.888
	Переходный	41.891
Force	Крейсерский	342.674

### Заключение

Таким образом, благодаря программе LMS Amesim есть возможность создания математической модели безотборной системы кондиционирования воздуха с достаточной степенью точности с учетом как электрической части, так и воздушной.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что наиболее нагруженным режимом является форсированный режим нагрузки. Поэтому, при проектировании реальной системы электропитания нужно уделить особое внимание этому режиму нагрузки и защитить электрическую цепь соответствующим образом.

Также следует учесть, что чем выше число оборотов, тем выше уровень шума и вибраций, производимого компрессором.



Однако данная схема была смоделирована в первом приближении, поэтому для увеличения точности вычисления нужно увеличить количество задаваемых переменных. Помимо этого, в ходе дальнейшего уточнения стоит проанализировать выбор размерности компрессора.

Кроме этого, из графиков видно, что потребные ха-

рактеристики компрессора при использовании паро-компрессионной УОВ ниже, чем при использовании турбохолодильника. Поэтому выбор УОВ в исполнении пароконпрессионной холодильной машины является более предпочтительным, чем УОВ в исполнении турбохолодильника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Innovation process. Model Stage-Gate Idea-to-launch. Stage-gate system Standard. URL: <http://stage-gate.com>
2. Cronin M.J. Design aspect of systems in all electric aircraft (SAE Techn. Pap. Ser.), 821436. DOI: <https://doi.org/10.4271/821436>.
3. Воронович С., Каргапольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет // Авиапанорама. 2009. № 2. С. 23–27.
4. Матвеев А.М. Системы оборудования летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2005. 558 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., М.: Наука, 1972. 721 с.
6. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Ленинград: Химия, 1966. 536 с.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
8. Смагин Д.И., Савельев Р.И. Методы разработки современных бортовых систем перспективного самолета // Обзор конференции «10 Международная конференция по машиностроению и аэрокосмической технике».
9. Смагин Д.И., Притулкин А.А. Формирование концепта перспективного самолета использующего альтернативные топлива и источники энергии // Обзор конференции «Гагаринские чтения - 2018».
10. Pekka Roytta. Study of a vapor-compression air-conditioning system for jetliners. Lappeenranta teknillinen yliopisto Digipaino.
11. ECS for the All Electric Aircraft Fabienne COUAILLAC MSc. AVD 2006-2007.
12. Каллиоппин А.К., Савельев Р.С., Смагин Д.И. Основные тенденции развития систем кондиционирования воздуха перспективных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017, Вып. 6.
13. Сатин А.А., Савельев Р.С. Моделирование авиационных систем кондиционирования воздуха пассажирских самолетов в программном комплексе Simintech // Computational nanotechnology. 2018. № 3. С. 24-31.
14. Каллиоппин А.К. Математическое моделирование авиационных систем кондиционирования воздуха. М.: МАИ, 1992. 77 с.
15. Антонова Н.В., Дубровин Л.Д., Егоров Е.Е. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
16. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Техно-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады ТУСУР. 2009. № 2. С. 179-184.
17. Ian Moir, Allan Seabridge. Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, third edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
18. Шустров Ю.М., Булаевский М.М. Авиационные системы кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 1978. 160 с.
19. Voronovich S., Kargapol'tsev V., Kutakhov V. All electric aircraft. Air panorama. 2009. № 2. Pp. 23–27.
20. Medic G., Sharma O.P., Jongwook L., Hardin L.W., McCormick D.C., Cousins W.T., Lurie E.A., Shabbir A., Holley B.M., Van Slooten P.R 2014 High Efficiency Centrifugal Compressor for Rotorcraft Applications NASA/CR-2014-218114. 2014.
21. Галеркин Ю., Солдатова К. Применение метода универсального моделирования для разработки этапов модели центробежного компрессора // Протоколы 8-й международной конференции по компрессорам и их системам. 2013. С. 477-487.
22. Van den Braembussche R. Centrifugal compressors: One dimensional design. (VKI Course Note No. 134), von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium. 1987.
23. Kim Y., Engeda A., Aungier R., Amineni N. A centrifugal compressor stage with wide flow range vaned diffusers and different inlet configurations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy. 2002. 216 (A4). 307-320.
24. Wygant K., Bygrave J., Bosen W., Pelton R., Tutorial on the application and design of integrally geared compressors. Proceedings of the Asia Turbomachinery and Pump Symposium. 2016. DOI: <https://doi.org/10.21423/R1N97X>.
25. Al-Busaidi W., Pilidis P. A new method for reliable performance prediction of multi-stage industrial centrifugal compressors based on stage stacking technique: Part I - existing models evaluation. Applied Thermal Engineering. 2016. 98. 10-28.
26. Came P.M., Robinson C.J. Centrifugal compressor design. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science. 1999. 213 (2). 139-155.
27. Dalbert P., Ribi B., Kmeci T., Casey M. Radial compressor design for industrial compressors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 1999. 213 (1). 71-83.
28. Flaxington D., Swain E. Turbocharger aerodynamic design. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 1999. 213(1). 43-57.
29. Krain H. Review of centrifugal compressor's application and development. Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME. 2005. 127 (1). 25-34.
30. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах. М.: МЭИ, 2005.
31. Акопов М.Г. Системы оборудования летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2005.
32. Барвинский А.П., Козлова Ф.Г. Электрооборудование самолетов, 1981.

33. Cronin M.J. Design aspect of systems in all electric aircraft (SAE Techn. Pap. Ser.). 821436. DOI: <https://doi.org/10.4271/821436>.

© Смагин Денис Игоревич (79637587781@yandex.ru), Старостин Константин Игоревич (ki-star1969@yandex.ru),  
Савельев Роман Сергеевич (r\_sr@inbox.ru), Напреенко Константин Сергеевич (konaprko@yandex.ru),  
Васильев Николай Георгиевич (col.vasilie2012@yandex.ru), Красавин Егор Эдуардович (krasavin.ieggor@mail.ru).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

