DOI: https://doi.org/10.17816/RF695782 EDN: CSWRDQ

Решение задач импортозамещения при ремонте винтовых холодильных компрессоров

И.В. Новиков, К.В. Печерских, В.А. Метелин, Т.Ю. Колосов, П.Е. Киселев, А.В. Логинов

Инженерно-технологические решения, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В статье представлен опыт компании «Инженерно-технологические решения» по техническому обслуживанию и ремонту винтовых компрессоров, когда при замене роторов используется методология адаптивного перерасчёта винтовой пары. Подход позволяет разрабатывать роторные пары, совместимые с существующими корпусами компрессоров. Приведены результаты проекта по реинжинирингу холодильного компрессора Howden WRVi. Одним из подтверждающих факторов корректности пересчётов является коэффициент подачи компрессора, демонстрирующий минимальные отклонения от оригинальных значений.

Цель — оценить возможность реинжиниринга винтовых роторных пар с использованием методики адаптивного перерасчёта.

Методы. Отсутствие оригинальных запасных частей ставит под угрозу надёжность оборудования и вынуждает предприятия искать решения в области импортозамещения. В статье описана методология адаптивного перерасчёта, учитывающая не только геометрию исходных роторов, но и комплекс эксплуатационных факторов. Приведены примеры успешной реализации проекта по реинжинирингу компрессора и подтверждена корректность решений через анализ и сравнение коэффициентов подачи.

Результаты. Инженеры ООО «Инженерные технологические решения» разработали конструкторскую документацию для винтовых роторов. Расчет компонентов выполнен с использованием адаптивной методики пересчета. В настоящее время указанные пары роторов находятся на стадии промышленного производства. Применение предложенной методики пересчета геометрии винтовых роторов привело к изменению их профиля. При этом ключевые эксплуатационные характеристики компрессоров сохранены на прежнем уровне. Анализ коэффициента подачи λ показывает, что новое рассчитанное значение имеет минимальные отклонения более 2% от исходного параметра, что еще раз подтверждает точность выполненных расчетов.

Выводы. Проведенные исследования подтвердили целесообразность реинжиниринга винтовых роторных пар с использованием методологии адаптивного пересчета. Минимальные отклонения коэффициента подачи указывают на то, что модернизированные роторы сохраняют эксплуатационные параметры компрессоров на уровне исходных агрегатов. Перепроектирование конструкции ротора обеспечило технологическую осуществимость изготовления роторных пар с использованием существующих российских производственных мощностей, что делает предложенный подход эффективным инструментом для импортозамещения.

Ключевые слова: винтовой компрессор; импортозамещение; реинжиниринг; винтовая пара; коэффициент подачи; адаптивный подход; эксплуатационные характеристики.

Как цитировать:
Новиков И.В., Печерских К.В., Метелин В.А., Колосов Т.Ю., Киселев П.Е., Логинов А.В. Решение задач импортозамещения при ремонте винтовых холодильных компрессоров // Холодильная техника. 2025. Т. 114. № 2. С. 85–90. doi: 10.17816/RF695782 EDN: CSWRDQ

Рукопись получена: 04.11.2025 **Рукопись одобрена:** 19.12.2025 **Опубликована online:** 22.12.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/RF695782 EDN: CSWRDQ

Solving the task of import substitution of screw refrigeration compressor repairing

Ilya V. Novikov, Konstantin V. Pecherskih, Valery A. Metelin, Timofey Y. Kolosov, Pavel E. Kiselev, Andrey V. Loginov

Engineering Technological Solutions, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: This article presents the experience of 'Engineering Technological Solutions' in the field of reverse engineering of screw compressors based on the methodology of adaptive recalculation of rotor meshing. This approach allows designing rotor pairs compatible with existing compressor housings without compromising key performance characteristics. The results of the Howden WRVi compressor reengineering projects are presented. One of the factors confirming the recalculation accuracy is the compressor flow coefficient, which shows a minimal deviation from the original values.

AIM: to evaluate the possibility of reengineering screw rotor pairs using adaptive recalculation methods..

METHODS: The lack of original spare parts compromises the reliability of equipment and forces companies to seek import substitution solutions. The article describes an adaptive recalculation methodology that takes into account not only the geometry of the original rotors, but also a number of operational factors. Examples of successful compressor reengineering projects are given, and the validity of the solutions is confirmed by analysis and comparison of flow coefficients.

RESULTS: Engineers at 'Engineering Technological Solutions' have developed design documentation for screw rotors. The components were calculated using an adaptive recalculation methodology. Currently, these rotor pairs are in the industrial production stage. The application of the proposed method for recalculating the geometry of screw rotors led to a change in their profile. At the same time, the key operational characteristics of the compressors were maintained at the initial level. Analysis of the flow coefficient λ shows that the new calculated value has minimal deviations of more than 2% from the initial parameter, which further confirms the accuracy of the calculations.

CONCLUSIONS: The studies conducted confirmed the feasibility of re-engineering screw rotor pairs using the adaptive recalculation methodology. The minimal deviations in the flow coefficient indicate that the modernised rotors maintain the operating parameters of the compressors at the level of the original units. The redesign of the rotor structure ensured the technological feasibility of manufacturing rotor pairs using existing Russian production capacities, which makes the proposed approach an effective tool for import substitution.

Keywords: screw compressor; import substitution; reverse engineering; screw rotor pair; flow coefficient; adaptive approach; performance characteristics.

To cite this article:
Novikov IV, Pecherskih KV, Metelin VA, Kolosov TY, Kiselev PE, Loginov AV. Solving the task of import substitution of screw refrigeration compressor repairing. *Refrigeration Technology.* 2025;114(2):85–90. doi: 10.17816/RF695782 EDN: CSWRDQ

Submitted: 04.11.2025 **Accepted:** 19.12.2025 **Published online:** 22.12.2025

ECO•VECTOR

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В российской промышленности сложилась критическая ситуация с эксплуатацией промышленных винтовых холодильных компрессоров иностранного производства. На текущий момент значительная часть промышленного оборудования, включая агрегаты ведущих мировых производителей (Aerzen, GEA Grasso, Howden), оказалась под угрозой выхода из строя вследствие прекращения официальных поставок запасных частей и сервисного обслуживания.

Сложившаяся ситуация требует системного подхода к решению проблемы импортозамещения, включающего не только организацию производства аналогов, но и разработку соответствующей нормативной базы, а также подготовку квалифицированного персонала и создание сервисной инфраструктуры.

Коллектив компании «Инженерно-технологические решения» имеет уникальный практический опыт, накопленный в ходе многолетней работы с винтовыми компрессорами различных типов и производителей. Специалисты компании непосредственно участвовали в проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании оборудования холодильного оборудования GEA Grasso, Howden, «Пензкомпрессормаш». Этот практический опыт дополняется глубоким пониманием конструктивных особенностей различных моделей, знанием типовых неисправностей и методов их устранения.

Опираясь на накопленный конструкторский и эксплуатационный опыт, наша команда реализует комплексные проекты по реверс-инжинирингу винтовых компрессорных установок. Практический опыт включает успешную разработку и внедрение аналогов решений винтовых компрессоров Howden, Leroi, Aerzen. GEA Grasso.

Принципиальным отличием нашей методологии является отказ от слепого копирования геометрических параметров винтовой пары. Вместо этого мы применяем систему адаптивного перерасчёта винтового зацепления, основанного на ключевых эксплуатационных характеристиках исходного оборудования. В расчет принимаются не только базовые параметры (производительность (м^3/ч), рабочие давления и габаритные размеры роторов), но и комплекс второстепенных факторов (допустимые производственные допуски, характеристики применяемых материалов, особенности смазочных систем). При этом новые роторные пары пересчитываются с учётом того, что они должны устанавливаться в уже существующие корпуса компрессоров, что позволяет избежать необходимости замены всего агрегата. Такой подход обеспечивает технологическую реализуемость производства на производственных мощностях в России без потери эксплуатационных качеств и подтвердить качество производства установленными ранее референсами. Также при замене винтовой пары в существующем компрессоре нет необходимости проводить комплекс проектных работ по оформлению замены компрессорного агрегата на позиции, либо проводить техническое перевооружение существующей системы.

ЦЕЛЬ

Настоящая работа посвящена оценке возможности реинжиниринга винтовых роторных пар с использованием методики адаптивного перерасчёта.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель, используемая при пересчете винтовой пары, включает систему уравнений, описывающих физические механизмы полного цикла работы компрессора. Эта система объединяет уравнение сохранения энергии и уравнение неразрывности массы совместно с рядом алгебраических уравнений, которые моделируют явления, сопровождающие всасывание, сжатие и нагнетание рабочей среды. Модель включает в себя дифференциальные кинематические соотношения, характеризующие изменение рабочего объема в зависимости от угла вращения или времени, и уравнения сохранения массы и энергии, записанные для выбранного контрольного объема. Данные уравнения используются на каждой стадии процесса: всасывания, сжатия и нагнетания, учитывая все сопутствующие физические эффекты.

Уравнение сохранения внутренней энергии:

$$\omega\left(\frac{dU}{d\Theta}\right)=\dot{m}_{вх}h_{вх}-\dot{m}_{вых}h_{вых}+Q-\omega p\frac{dV}{d\Theta}, \quad (1)$$

где Θ — угол вращения ведущего ротора, $h=h(\Theta)$ — удельная энтальпия, $\dot{m}=\dot{m}(\Theta)$ — массовый расход, $p=p(\Theta)$ — давление в контрольном объеме рабочей камеры, $Q=Q(\Theta)$ — тепловой поток между рабочим телом и поверхностями компрессора, $V=V(\Theta)$ — объем рабочей камеры.

Полная энтальпия входящего потока среды состоит из следующих компонентов:

$$\dot{m}_{вх}h_{вх}=\dot{m}_{вс}h_{вс}+\dot{m}_{пр.ут}h_{пр.ут}+\dot{m}_{м}h_{м}\,. \quad (2)$$

Полная энтальпия выходящего потока среды записывается в виде:

$$\dot{m}_{вых}h_{вых}=\dot{m}_{н}h_{н}+\dot{m}_{пот.ут}h_{пот.ут}. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности принимает вид:

$$\omega\frac{dm}{d\Theta}=\dot{m}_{вх}-\dot{m}_{вых}. \quad (4)$$

Массовый расход на входе можно представить суммой следующих составляющих:

$$\dot{m}_{вх}=\dot{m}_{вс}+\dot{m}_{пр.ут}+\dot{m}_{м}. \quad (5)$$

DOI: https://doi.org/10.17816/RF695782

Массовый расход на выходе состоит из можно принять в виде:

$$\dot{m}_{вых} = \dot{m}_{н} + \dot{m}_{пот.ут}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) удовлетворяют следующему уравнению неразрывности:

$$\dot{m} = \rho w A, \quad (7)$$

где w — скорость потока, ρ — плотность потока и A — площадь поперечного сечения потока.

Площадь поперечного сечения A получается из расчета геометрии и рассматривается как периодическая функция от угла вращения Θ. Площадь окна всасывания:

$$A_{вс} = A_{вс,0} \sin\left(\pi \frac{\Theta}{\Theta_{вс}}\right), \quad (8)$$

где $A_{вс,0}$ — наибольшее значение площади окна всасывания.

Площадь окна нагнетания:

$$A_{н} = A_{н,0} \sin\left(\pi \frac{\Theta - \Theta_{к.н}}{\Theta_{к.сж} - \Theta_{н}}\right), \quad (9)$$

Скорости потока в окнах всасывания и нагнетания вычисляются согласно формуле:

$$w = \mu\sqrt{2\left(h_2 - h_1\right)}, \quad (10)$$

где μ — коэффициент расхода окна всасывания/нагнетания, а индексы 1 и 2 обозначают условия направленности вниз и вверх для рассмотренных окон, соответственно.

В винтовых машинах утечки достигают значительной доли от общей подачи, что существенно влияет на работу компрессора. Они воздействуют как на массовый расход, снижая коэффициент подачи, так и на термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) процесса сжатия. Для анализа влияния утечек на рабочий процесс удобно разделить их на два типа в зависимости от направления относительно рабочей камеры: утечки поступления массы и утечки потерь массы. Утечки поступления возникают при попадании среды из полости нагнетания или соседней камеры с повышенным давлением, тогда как утечки потерь массы связаны с выходом рабочей среды в полость нагнетания или в соседнюю камеру с более низким давлением. Скорость утечек рассчитывается на основе приближенного анализа потока через зазор, где процесс в основном описывается адиабатическим течением Фанно. Для упрощения вычислений на отдельных этапах могут применяться допущения о постоянной температуре (T=const) или постоянной энтальпии (h = const). Такие упрощения, хотя и отклоняются от строго адиабатических условий, тем не менее оказывают лишь локальное влияние при дифференциальном анализе, т.е. при рассмотрении малых изменений угла поворота вала, как это предусмотрено в представленной модели. Следует отметить, что данная модель учитывает исключительно утечки газовой среды.

Идеализированный зазор щели принимается прямоугольной формы и массовый расход просачивающегося потока выражается по уравнению неразрывности:

$$\dot{m}_{y} = \mu_{y}\rho_{y}w_{y}A_{з}, \quad (11)$$

где ρ_{y} — плотность утечки (плотность просачивающегося газа), w_{y} — скорость утечки, $A_{з} = l_{з}\delta_{з}$ — площадь поперечного сечения зазора, $l_{з}$ — длина зазора, уплотнительная линия, $\delta_{з}$ — ширина зазора, $\mu_{y} = \mu\left(Re, Ma\right)$ — коэффициент массового расхода через зазор.

Скорость просачивающегося газа определяется из уравнения:

$$w_{y}dw_{y} + \frac{dp}{\rho} + f\frac{w_{y}^{2}}{2}\frac{dx}{D_{з}} = 0, \quad (12)$$

где $f = f\left(Re, Ma\right)$ — коэффициент трения, $D_{з} = 2\delta_{з}$ — эффективный диаметр зазора, dx — приращение по длине.

По уравнение неразрывности, принимая T = const, для исключения плотности газа в отношении давления, может быть проинтегрировано по давлению от стороны высокого давления с положением 2 до стороны низкого давления с положением 1 в щели для того, чтобы получить:

$$\dot{m}_{y} = \rho_{y}w_{y}A_{з} = \sqrt{\frac{p_2^2 - p_1^2}{a^2\left(\varsigma + 2ln\frac{p_2}{p_1}\right)}}, \quad (13)$$

где $\varsigma = f\frac{l_{з}}{D_{з}} + \sum\xi$ — характеризирует сопротивление утечки с длиной зазора $l_{з}$ в направлении утечки потока. Этот параметр может быть оценен для каждого зазора как функция его линейных размеров и формы, а также характеристик потока. ξ — коэффициент местного сопротивления, f — коэффициент трения, a — скорость звука.

Впрыск масла или других жидкостей в целях смазки, охлаждения или уплотнения, в значительной степени изменяет термодинамический процесс в винтовом компрессоре. Подходящим параметром для определения массы впрыснутого масла является массовое отношение масла к газу:

$$\dot{m}_{м} = \frac{\dot{m}_{м}}{\dot{m}_{г}}\dot{m}\frac{z_1}{2\pi}, \quad (14)$$

где массовое отношением масла к газу задается заранее как входной параметр.

В дополнении к смазыванию, масло подается в компрессор для охлаждения газа. Математическая модель учитывает этот процесс, по упрощенной процедуре, в которой теплообмен с газом определяется по дифференциальному

уравнению для мгновенного значения теплопередачи между окружающим газом и каплями масла.

При определении свойств среды, для идеального газа внутренняя энергия газомасляной смеси задается как:

$$U = (mu)_г + (mu)_м = \frac{mRT_г}{\gamma - 1} + (mcT)_м = \\ = \frac{pV}{\gamma - 1} + (mcT)_м, \quad (15)$$

где R — газовая постоянная, γ — показатель адиабаты.

Давление или температура среды в рабочей камере может быть явно вычислено с помощью уравнения для $T_м$:

$$T = (\gamma - 1)\frac{(1+k)U - (mcT)_м}{(1+k)mR + (mc)_м}. \quad (16)$$

Численное решение уравнений, составляющих математическую модель физического процесса в компрессоре, дает важные параметры, которые позволяют с высокой точностью вычислить итоговые (массовые) характеристики.

Фактический массовый расход газа определяется через массу рабочего тела в камере сжатия. Основное расчетное соотношение имеет вид:

$$\dot{m} = m \cdot z_1 \cdot n / 60, \quad (17)$$

где m — масса газа в рабочей камере за полный цикл работы, z_1 — число зубьев ведущего ротора, n — частота вращения ведущего ротора.

При этом масса газа в камере представляет собой разность между итоговыми (поступающим и выходящим) потоками, которые определяются интегрированием соответствующих дифференциальных уравнений по всему циклу:

$$m = m_{вх} - m_{вых}. \quad (18)$$

Объемная подача:

$$\dot{V} = 60m / \rho_0. \quad (19)$$

По известному максимальному объему рабочей камеры теоретический массовый расход:

$$\dot{m}_{теор} = \frac{(F_1 + F_2)Lnz_1\rho}{60}, \quad (20)$$

где F_1 и F_2 — площади поперечного сечения впадин между зубьями ведомого и ведущего роторов, L — длина винтовой части.

Коэффициент подачи определяется из соотношения:

$$\lambda = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{теор}}. \quad (21)$$

Коэффициент подачи винтового компрессора представляет собой важнейший показатель эффективности работы оборудования. Он отражает соотношение между фактической подачей газа и теоретически возможной величиной, определяемой геометрическими параметрами рабочей камеры.

ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках реализованных проектов специалистами компании «Инженерно-технологические решения» была разработана конструкторская документация на винтовые пары. Расчёт элементов осуществлялся с применением методики адаптивного перерасчёта.

Применение предложенной методики при пересчёте геометрии винтовых роторов обусловило изменением их профиля. При этом ключевые эксплуатационные характеристики компрессоров были сохранены на исходном уровне.

Анализ коэффициента подачи λ показывает, что новое расчётное значение демонстрирует минимальные отклонения от оригинального показателя, что подтверждает корректность выполненных расчётов в теории и на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования инженеров ООО «Инженерно-технологические решения» подтвердили возможность реинжиниринга винтовых роторных пар с использованием методики адаптивного перерасчёта (рис. 1). Минимальные отклонения коэффициента подачи показывают, что модернизированные роторы обеспечивают сохранение рабочих параметров компрессоров на уровне оригинальных изделий в пределах 2% отклонения показателя. Перерасчёт конструкции обеспечил технологическую реализуемость производства роторных пар на существующих российских

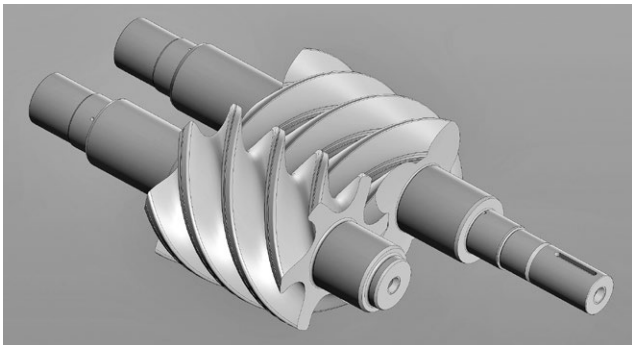

Рис. 1. 3D-модель перерассчитанной винтовой пары компрессора Howden WRVi 255.110.
Fig. 1. 3D model of the recalculated screw pair of the Howden WRVi 255.110 compressor.

Табл. 1. Коэффициенты подачи компрессоров. Сравнительная таблица
Tab. 1. Compressor flow rates. Comparison table

	Howden WRVi 255.110
Оригинальное значение параметра λ	0,940
Значение параметра λ, полученное при пересчете винтовой пары	0,920

мощностях, что делает предложенный подход эффективным инструментом импортозамещения и гарантирует надёжную эксплуатацию оборудования при отсутствии оригинальных комплектующих (табл. 1).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты настоящей работы, гарантируют надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источник финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Все авторы являются сотрудниками ООО «Инженерно-технологические решения» (Санкт-Петербург). Авторы заявляют об отсутствии иных отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент и член редакционной коллегии.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: All authors are employees of Engineering and Technological Solutions LLC (St. Petersburg). The authors have no other relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work, and no new data has been collected or created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer and a member of the editorial board participated in the review

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Amosov PE, Bobrikov NI, Shvarts AI. *Screw Compressor Machines.* Leningrad: Mashinostroenie; 1977. (In Russ.)

2. Andreev PA. *Screw Compressor Machines.* Leningrad: SUDPROM; 1961. (In Russ.)

3. Sakun IA. *Screw Compressors: Theory, Calculation, Design.* Leningrad: Mashinostroenie; 1970. (In Russ.)

4. Handjalik K, Stosich N. Development and Optimization of Screw Machines Using a Simulation Model. Part II: Thermodynamic Implementation, Modeling, and Design. *Journal of Fluids Engineering.* 1997;119:664–668.

5. Handjalik K, Stosich N. Application of Mathematical Modeling of Screw Machines for Tooth Profile Optimization. In: *Proceedings of VDI Tagung Schraubenmaschinen 94.* Dortmund: VDI Berichte; 1994:1135.

ОБ АВТОРАХ

*** Новиков Илья Владимирович,**
канд. техн. наук, член-корр. МАХ
адрес: Россия, 195112, Санкт-Петербург, Красногвардейская пл., 3е;
ORCID: 0000-0003-1632-4213;
email: murometc@rambler.ru

Печерских Константин Викторович;
email: const83@mail.ru

Метелин Валерий Андреевич;
ORCID: 0009-0001-4899-381X;
email: v.metelin@i-t-r.net

Колосов Тимофей Юрьевич;
email: t.kolosov@i-t-r.net

Киселев Павел Евгеньевич;
ORCID: 0000-0003-4338-3390;
eLibrary SPIN: 2021-0990;
email: p.kiselev@i-t-r.net

Логинов Андрей Владимирович;
ORCID: 0009-0003-4184-1279;
email: v.loginov@i-t-r.net

AUTHOR'S INFO

*** Ilya V. Novikov,**
Cand. Sci. (Engineering), corresp. member of IRA
address: 3e Krasnogvardeyskaya pl, Saint Petersburg, Russia 195112;
ORCID: 0000-0003-1632-4213;
email: murometc@rambler.ru

Konstantin V. Pecherskih;
email: const83@mail.ru

Valery A. Metelin;
ORCID: 0009-0001-4899-381X;
email: v.metelin@i-t-r.net

Timofey Y. Kolosov;
email: t.kolosov@i-t-r.net

Pavel E. Kiselev;
ORCID: 0000-0003-4338-3390;
eLibrary SPIN: 2021-0990;
email: p.kiselev@i-t-r.net

Andrey V. Loginov;
ORCID: 0009-0003-4184-1279;
email: v.loginov@i-t-r.net

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author