

Экспериментальная оценка рациональных параметров предпускового ускорения для обеспечения запуска маршевых жидкостных ракетных двигателей в условиях невесомости

© В.Б. Сапожников¹, А.Р. Полянский¹, А.В. Корольков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, 141005, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов осаждения жидкого топлива в баках жидкостных ракетных двигательных установок в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета под действием малой предпусковой перегрузки, создаваемой вспомогательными двигателями перед запуском маршевого жидкостного ракетного двигателя. С использованием метода подобия и размерности сформирована структура безразмерных комплексов, определяющих зависимость времени, необходимого для осаждения топлива к заборному устройству бака, от перегрузки, степени заполнения бака и физических свойств топлива. Выявлено, что вязкость топлива практически не влияет на скорость его осаждения. Проанализировано влияние капиллярных и массовых сил на время сепарации газовых включений в жидком топливе. Установлено, что движение газовых пузырей в жидкости под действием продолжительного импульса предпусковой перегрузки приобретает квазистационарный характер.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, топливный бак, невесомость, перегрузка, осаждение топлива, сепарация газа

Введение. Поведение жидкого топлива и газа наддува в топливных баках летательных аппаратов в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета определяет нормальное функционирование жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Для летательных аппаратов, находящихся в условиях свободного орбитального (суборбитального) полета, основным условием нормального функционирования ЖРД становится непрерывность подачи компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали топливных баков без нарушения сплошности потока. Одним из способов, обеспечивающих такую непрерывность, является осаждение топлива к заборному устройству (расходной магистрали) бака и сепарация газовых включений под действием предпускового ускорения (предпусковой перегрузки), создаваемого вспомогательными ракетными двигателями малой тяги непосредственно перед заполнением расходных магистралей для запуска маршевого двигателя.

Поэтому решение задачи о динамике жидкого топлива и газа наддува в топливных баках жидкостной ракетной двигательной установки при переходе от невесомости к перегрузке представляет несомненный практический интерес. Однако процессы осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки оказываются наиболее сложными для теоретического исследования, которое к тому же не всегда гарантирует получение желаемых и достоверных результатов.

В связи с этим наряду с выполненным ранее численным решением краевой задачи Дирихле [1] и теоретическими результатами, представленными в [2], была проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых описаны ниже. Для постановки экспериментов и обработки полученных результатов были использованы методы анализа размерностей [3]. Цель работы — определение влияния продолжительности импульса предпусковой перегрузки на процесс движения газовых пузырей в жидкости.

Постановка задачи экспериментальных исследований. Описание экспериментальных установок и методик проведения экспериментов. До настоящего времени отсутствуют общепринятые методы оценки оптимальной продолжительности действия и величины предпускового ускорения, необходимого для осаждения топлива и сепарации газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения. Обычно для этой цели используют приближенные соотношения, основанные на оценке продолжительности двух стадий процесса осаждения: прилива жидкого топлива к заборному устройству (входу в расходную магистраль) бака и очищения жидкости от образующихся при этом свободных газовых включений. При таком подходе продолжительность первой стадии оценивают на основании закона свободного падения [4], а второй — по эмпирической формуле движения в жидкости твердой сферы некоторого осредненного радиуса под действием архимедовой силы. Проведенные исследования показали, что данная методика оценки может приводить как к завышенным на 50...100 %, так и к заниженным на 30...50 % результатам в зависимости от структуры газожидкостной смеси, коэффициента заполнения бака и предпускового ускорения. Недостаточно эффективным является и метод, изложенный в работе [5], поскольку в его основе также лежит ориентация на некоторый осредненный размер свободного газового включения.

Для моделирования задач газожидкостных течений со свободными поверхностями в [6] предложен метод «метка-ячейка» (Marker and Cell, MAC) Позднее в работе [7] было сообщено о создании программы для математического моделирования процессов осаждения топлива, приведены исходная система уравнений и основные приемы ее

конечно-разностной аппроксимации. Показано, что результаты расчета удовлетворительно совпадают с кинограммами внутрибаковых процессов при экспериментальных исследованиях. Вместе с тем отмечено, что при пересчете результатов моделирования с маломасштабных моделей на полноразмерные баки наблюдается существенное различие между расчетными и экспериментальными данными, которое объясняется невозможностью точного воспроизведения начальных условий на поверхности раздела фаз. Кроме того, повторение расчетов по методике [7] для баков другой формы и при иных начальных условиях практически невозможно из-за отсутствия в материалах статьи необходимой информации.

В связи с этим в ходе решения практических задач возникла необходимость получения экспериментальных данных по основным закономерностям процесса осаждения топлива. С этой целью был проведен комплекс специальных исследований на установках типа башен невесомости и в летающей лаборатории [8] по оценке времени осаждения газожидкостных смесей под действием предпускового ускорения.

В задаче о динамике процесса осаждения жидкого топлива и сепарации свободных газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения, при заданной постоянной интенсивности поля массовых сил ng_0 , где $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ и n — перегрузка, вызывает интерес время t , в течение которого жидкий компонент топлива будет локализован в районе заборного устройства и очищен от свободных газовых включений. Очевидно, что при заданной степени заполнения (коэффициенте заполнения бака φ) время t будет определяться интенсивностью поля массовых сил ng_0 , физическими свойствами жидкости (вязкостью ν , поверхностным натяжением σ и плотностью ρ) и геометрией бака (в виде некоторого характерного размера l). Таким образом, все независимые переменные будут учтены следующим выражением:

$$t = f(ng_0, \nu, \sigma, \rho, l). \quad (1)$$

Выражение (1) представляет собой некую функциональную зависимость между шестью размерными величинами. Если размерности этих величин будут выражены в системе СИ, то, применив π -теорему [3], легко прийти к заключению, что функцию (1) можно представить как зависимость трех безразмерных комплексов. Согласно анализу размерностей [3] получим:

$$[t] = [ng_0]^\alpha [\nu]^\beta [\sigma]^\gamma [\rho]^\delta [l]^\varepsilon,$$

или

$$[c] = [\text{м/с}^2]^\alpha \cdot [\text{м}^2/\text{с}]^\beta \cdot [\text{кг/с}^2]^\gamma \cdot [\text{кг/м}^3]^\delta \cdot [\text{м}]^\varepsilon, \quad (2)$$

Из (2) следует, что $\delta = -\gamma$, т. е. число переменных в интересующей нас задаче может быть уменьшено на единицу:

$$t = f_1(ng_0, v, \sigma/\rho, l). \quad (3)$$

Теперь перепишем уравнение (2):

$$[c] = [m/c^2]^a \cdot [m^2/c]^b \cdot [m^3/c^2]^c \cdot [m]^d. \quad (4)$$

Приравняв показатели степеней при одноименных размерностях левой и правой частей выражения (4), получим, что искомая зависимость должна иметь вид:

$$t \sqrt{\frac{ng_0}{l}} = A(\varphi)(Bo)^m (Ga)^n. \quad (5)$$

Здесь $A(\varphi)$ — экспериментально определяемая константа, зависящая от коэффициента заполнения бака φ ; m, n — экспериментально определяемые показатели степеней при числах Бонда $Bo = (\rho n g_0 r^2)/\sigma$ и Галилея $Ga = (n g_0 r^3)/v^2$. В качестве характерного размера r в числах Бонда и Галилея следует принимать размер (например, радиус) сепарируемых свободных газовых включений.

Для экспериментального определения указанных параметров были использованы, во-первых, стенд невесомости, где условия практической невесомости достигаются при свободном падении испытываемого оборудования (такие стенды получили название «башни невесомости») и, во-вторых, летающая лаборатория (ЛЛ) [8]. Для создания на борту ЛЛ (самолета) состояния невесомости применяют специальную технику пилотирования — полет по «параболе Кеплера». Сначала самолет разгоняют до максимальной скорости, затем переводят в набор высоты и при достижении угла кабрирования $45...50^\circ$ движением штурвала за $1...2$ с создают вертикальную нулевую перегрузку. В этот момент на борту ЛЛ возникает состояние невесомости, находиться в котором допускается до $20...25$ с. Самолет за это время переходит на пикирование с углом $45...50^\circ$, после чего выводится в горизонтальный полет с вертикальной перегрузкой в $2g$.

Установка для исследования процессов всплытия газовых пузырьков в жидкости при переходе от невесомости к перегрузке, которая использовалась в составе стенда невесомости, представляет собой испытательный контейнер в форме параллелепипеда. Внутри контейнера размещены оптически прозрачная модель, программно-временное устройство, кинокамера, устройство для формирования газовой полости и твердотопливные ракетные двигатели малой тяги для создания импульсных перегрузок, действующих на испытательный контейнер в процессе его свободного падения. В общем, если

считать ошибки измерения независимыми случайными величинами, максимальная погрешность конечных результатов серии экспериментов составила не более 18...20 %.

Исследование характера и закономерностей процесса всплытия газовой полости в жидкости при воздействии длительных (более 1 с) перегрузок малой величины на стенде невесомости проводить не удастся вследствие недостаточной продолжительности состояния невесомости. В связи с этим эксперименты по изучению процесса всплытия газовой полости при действии импульсов перегрузки длительностью более 1 с были проведены с использованием ЛЛ.

Поскольку в условиях самолета-лаборатории остаточные перегрузки n_x по продольной оси ЛЛ составляют от 10^{-3} до $2 \cdot 10^{-2}$ единиц, была проведена выборка из всей серии полетов тех режимов, при которых остаточные перегрузки не превышали $5 \cdot 10^{-3}$ единиц. Методика экспериментов на ЛЛ заключалась в следующем. За 1...2 с до начала режима невесомости включают слив жидкости из модели в сливную емкость. К моменту наступления невесомости в модельной емкости начинает образовываться газовая подушка, которая через 4...6 с после начала режима невесомости приобретает форму, близкую к равновесной. На 8...10-й с полета по кеплеровской траектории по команде оператора пилот создает малую (до 0,1) перегрузку в направлении n_x , совпадающем с продольной осью ЛЛ. Длительность перегрузки определяется программой эксперимента. В течение всего его времени поведение газовой полости контролируется с помощью кинокамеры. В ходе эксперимента измеряют газовую полость, а также величину и время действия импульса перегрузки, которые регистрируются светолучевым осциллографом К20-21. Максимальная погрешность конечных результатов для экспериментов на ЛЛ несколько выше, чем в условиях стенда, она достигает 22...25 %, поскольку значение перегрузки усредняется за все время ее действия.

Результаты экспериментов. В ходе экспериментов на стенде невесомости и на ЛЛ было установлено, что влияние вязкости (числа Галилея) на скорость осаждения практически отсутствует (показатель степени n оказался близким к нулю), если радиус всплывающей газовой

полости $r \geq r_{\min}$, где $r_{\min} = \left[\frac{324\mu^2\sigma}{\rho^3 (ng_0)^2} \right]^{1/5}$ [7]; μ — коэффициент дина-

мической вязкости жидкости.

Это согласуется с выводом В.Г. Левича [9] о том, что такое же значение r_{\min} может быть получено из условия начала деформации всплывающей газовой полости

$$r_{\min} \geq \sqrt{\frac{\sigma}{\rho ng_0}}.$$

На рисунке приведены результаты выполненных экспериментальных исследований, которые в диапазоне чисел Бонда 0,2...100 могут быть обобщены эмпирической зависимостью

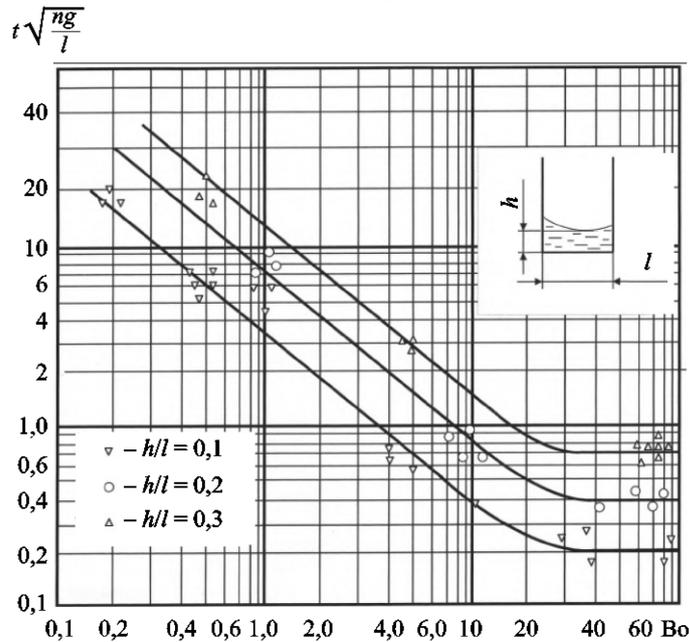
$$t\sqrt{ng/l} = 2hl^{-1}\text{cth}(0,06\text{Bo}), \quad (6)$$

где t — время всплытия свободных газовых включений размером $r \geq r_{\min}$ на высоту h от нижнего полюса (заборного устройства) бака с

характерным размером l , причем число Бонда $\text{Bo} = \frac{\rho ng_0 r_{\min}^2}{\sigma}$ следует

рассчитывать по указанному выше значению $r_{\min} = \left[\frac{324\mu^2\sigma}{\rho^3 (ng_0)^2} \right]^{1/5}$.

Анализ кинограмм процесса сепарации показал, что при всплытии газовых полостей под действием перегрузки ng_0 свободная поверхность полости деформируется как в ее нижней части, так и на боковых участках. Разрушению полости предшествует образование на границе раздела жидкость — газ сложной системы волн. Иногда разрушение происходит лишь в шлейфовой (кормовой) части всплывающей под действием перегрузки газовой полости. Было высказано предположение, что в процессе сепарации главную роль в динамике газовой полости играет характер распределения давления на ее поверхности при обтекании полости окружающей жидкостью.



Время сепарации газожидкостной смеси на высоту h под воздействием поля массовых сил интенсивностью ng

Необходимо отметить, что под воздействием длительного импульса предпусковой перегрузки движение газовых пузырей в жидкости приобретает квазистационарный характер. Такой вывод подтверждают экспериментальные данные, приведенные в работах [10–12].

Заключение. С использованием теории подобия и размерностей сформированы безразмерные комплексы, определяющие зависимость времени осаждения топлива к заборному устройству от перегрузки степени заполнения бака и физических свойств топлива при запуске маршевых ЖРД в условии невесомости.

В результате проведенных исследований установлено, что время осаждения топлива не зависит от его вязкости. Кроме того, получена эмпирическая зависимость безразмерного времени всплытия свободных газовых пузырей от числа Бонда. Начиная с чисел Бонда, превышающих 40...50 (если число Бонда определять по минимальному радиусу свободных газовых включений, деформирующихся при всплытии в процессе сепарации), безразмерное время сепарации не зависит от числа Бонда, а определяется только интенсивностью перегрузки ng_0 и коэффициентом заполнения бака φ .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 2005, № 4, с. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. *Int. Scientific Conf. "Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development"* (Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014): abstracts. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. 8-е изд., перераб. Москва, Наука, 1977, 440 с.
- [4] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system. *AIAA Paper*, 1969, no. 69–567, pp. 53–65.
- [5] Калинин Э.К., Невровский В.А. К оценке времени осаждения жидкости в баке под действием малой перегрузки. *Инж.-физ. журнал*, 1986, т. 50, № 6, с. 930–934.
- [6] Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Physics of Fluids*, 1965, vol. 8, no. 12, pp. 2182–2189.
- [7] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J. I. Numerical modeling of on-orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration. *AIAA/SAE/ASME/ASEE: 23 Joint Propulsion conf. 29 June — 2 July 1987*. San-Diego, Calif. USA, 1987, 22 p.
- [8] Сапожников В.Б., Авраамов Н.И. Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию одиночных импульсов перегрузки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-02-1581

- [9] Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. Москва, Ленинград, Физматгиз, 1959, 699 с.
- [10] Воинов О.В. Условия разрушения сферического газового пузыря в жидкости при нелинейных пульсациях. *Доклады Академии наук*, 2008, т. 422, № 6, с. 750–754.
- [11] Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С. Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплытия одиночного пузырька. *Инж.-физ. журн.*, 2013, т. 86, № 5, с. 1097–1106.
- [12] Архипов В.А., Васенин И.М., Ткаченко А.С., Усанина А.С. О нестационарном всплытии пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. *Механика жидкости и газа*, 2015, № 1, с. 86–94.

Статья поступила в редакцию 02.07.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В. Экспериментальная оценка рациональных параметров предпускового ускорения для обеспечения запуска маршевых жидкостных ракетных двигателей в условиях невесомости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1916>

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: газогидродинамика при течении жидкостей и газов в структурно-сложных средах. Автор около 120 научных публикаций. e-mail: sapojnikov47@mail.ru

Полянский Александр Ромилович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика течений в энергетических установках. Автор около 90 научных публикаций. e-mail: korolev100-rd@mail.ru

Корольков Анатолий Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: газогидродинамика при течении жидкостей и газов в структурно-сложных средах. Автор порядка 100 научных публикаций. e-mail: an_korolkov@mail.ru

Experimental evaluation of rational parameters of pre-acceleration to ensure liquid sustainer engine launch in zero gravity

© V.B. Sapozhnikov¹, A.R. Polyanskiy¹, A.V. Korolkov²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russia

The paper presents the results of experimental studies of liquid fuel deposition processes in liquid rocket propulsion system tanks under the conditions of free, i.e. unperturbed, orbital and suborbital flight under the influence of small prestart G-load created by auxiliary engines before liquid sustainer engine launch. Having conducted the dimension analysis, we formed the structure of dimensionless groups, which determine the dependence of the time required for fuel deposition to the tank intake, on the g level, the degree of tank filling and the physical properties of the propellant. Experimental studies were carried out on a zero gravity test bench, using the principle of implementing below-G conditions at the free fall of the equipment under test, and on a laboratory aircraft at the "Kepler's parabola" flight. The results of experimental studies have shown that the effect of viscosity on the deposition rate is practically absent. At the same time, in experiments it was found that, starting with Bond numbers exceeding 40 ... 50, the dimensionless separation time does not depend on Bond number, the value of the latter being determined by the minimum radius of free gas inclusions, deformed during when ascending during the separation process. Findings of research show that with a considerable duration of the prestart G load pulse, the movement of gas bubbles in the liquid under the action of a G load pulse becomes quasistationary.

Keywords: liquid rocket propulsion system, tank, weightlessness, G-load, fuel deposition, gas separation, experimental studies

REFERENCES

- [1] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik – Forestry Bulletin*, 2005, no. 4, pp. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecraft' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. *International Scientific Conference "Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development" (Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014): abstracts*. Moscow, BMSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimension in mechanics]. 8th ed., corr. Moscow, Nauka Publ., 1977, 440 p.
- [4] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system. *AIAA Paper* no. 69–567, 1969, pp. 53–65.
- [5] Kalinin E.K., Nevrovskiy V.A. *Inzh.-fiz. zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1986, vol. 50, no. 6, pp. 930–934.
- [6] Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Physics of Fluids*, 1965, vol. 8, no. 12, pp. 2182–2189.

- [7] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J.I. Numerical modeling of in orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration. *AIAA/SAE/ASHE/ASEE: 23 Joint Propulsion conf. 29 June–2 July 1987. San-Diego, Calif., USA*. New York, 1987, 22 p.
- [8] Sapozhnikov V.B., Avraamov N.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-02-1581
- [9] Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. Moscow, Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1959, 699 p.
- [10] Voinov O.V. *Doklady Akademii nauk (Proceedings of the USSR Academy of Sciences)*, 2008, vol. 422, no. 6, pp. 750–754.
- [11] Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S. *Inzh.-fiz. zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 5, pp. 1097–1106.
- [12] Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Tkachenko A.S., Usanina A.S. *Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2015, no. 1, pp. 86–94.

Sapozhnikov V.B., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: gas-hydrodynamics with flow of liquids and gases in structurally complex environments. Author of about 120 scientific papers. e-mail: sapojnikov47@mail.ru

Polyanskiy A.R., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: fluid dynamics of flows in power plants. Author of about 90 scientific papers. e-mail: korolev100-rd@mail.ru

Korolkov A.V., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: gas-hydrodynamics with flow of liquids and gases in structurally complex environments. Author of about 100 scientific papers. e-mail: an_korolkov@mail.ru