

Н. Л. Великанов, В. А. Наумов, С. И. Корягин

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСИ ПО ВОДОТОКУ ПРИ ДИФФУЗНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

90

Рассмотрено диффузное загрязнение с учетом боковой приточности. В расчетной схеме примесь обладает малой инерцией, осаждение частиц является установившимся. В качестве начальных условий по концентрации и в исходном сечении водотока заданы фоновые значения, а также интенсивность диффузного сброса вдоль береговой линии. Представлены результаты решения краевой задачи численным методом в среде Mathcad. Показаны результаты исследования профилей безразмерной концентрации осаждающейся примеси. Графики представлены в безразмерных переменных.

The diffuse pollution is considered taking into account the lateral inflow. In the calculation scheme, the impurity has a small inertia, the deposition of particles is steady. Background values are set as initial conditions for the concentration and in the initial section of the watercourse, and the intensity of the diffuse discharge along the shoreline is set. The results of solving the boundary value problem by numerical method in Mathcad are presented. The results of the study of the profiles of dimensionless concentration of the precipitating admixture are shown. Graphs are presented in dimensionless variables.

Ключевые слова: диффузное загрязнение, осаждение частиц, диффузный сброс, профиль безразмерной концентрации.

Keywords: diffuse pollution, particle sediment, diffuse discharge, the profile of the dimensionless concentration.

В последнее время опубликовано много работ, связанных с моделированием перемещения частиц в водотоках [1–14]. При этом в подавляющем большинстве исследований источник взвешенного вещества считается точечным.

В работе [15] рассмотрено математическое моделирование диффузного загрязнения водотоков, при этом расход и скорости считаются неизменными. Но наибольшее загрязнение площади водосбора происходит во время половодья и паводковых явлений, когда расход воды может значительно увеличиваться вниз по течению. В настоящей статье рассмотрено диффузное загрязнение с учетом боковой приточности.

Естественным следствием роста промышленности является увеличение количества загрязненных сточных вод, часто с весьма сложным составом органических загрязнителей. Они сбрасываются в водоемы общественного пользования, что приводит к сильному загрязнению, не говоря уже о малых водоемах, в которые спускаются сточные воды го-



родов и различных производств. Крупные реки настолько загрязнены, что это отражается на питьевом и техническом водоснабжении, рыболовстве и сельском хозяйстве.

Нормы сброса сточных вод в различных странах относятся или к качеству воды водоприемника, или к качеству сбрасываемых вод. В первом случае водоемы разделяются на ряд категорий в зависимости от их хозяйственного значения, а во втором к составу сбрасываемых сточных вод предъявляются стандартные требования в отношении ВПК, содержания взвеси.

Однако при всех условиях первоочередным мероприятием должно быть упорядочение технологического процесса.

Выбор метода очистки зависит от характера загрязнений сточных вод. Для очистки некоторых вод, главным образом содержащих минеральные вещества, может быть применена химическая обработка с последующим отстаиванием образующегося осадка. Для сточных вод, загрязненных органическими веществами, наиболее полную степень очистки дают биохимические методы.

На современном этапе развития промышленности состав городских сточных вод значительно изменился вследствие поступления в городскую канализацию промышленных стоков. Для очистки промышленных сточных вод, содержащих органические загрязнители, их совместная очистка с бытовыми водами представляется целесообразной как с санитарной, так и с экономической точки зрения. В тех случаях, когда примесь бытовых вод к производственным не обеспечивает необходимого количества биогенных элементов для биохимического процесса распада органических веществ, биогенные элементы должны быть добавлены в виде солей азота и фосфора.

Биохимический процесс распада органических веществ производственных стоков и бытовой воды принципиально один и тот же. В обоих случаях он идет под влиянием микроорганизмов и протекает в одинаковых условиях (реакция среды, температура и т.д.). Состав применяемых очистных сооружений также одинаков. Для предварительной обработки сточной жидкости (до биохимической очистки) применяют решетки, песколовки, первичные отстойники. Большое распространение имеют радиальные отстойники — как предварительные, так и вторичные (после биохимической очистки). Время пребывания жидкости в отстойниках колеблется от 1 до 9,8 ч.

Наиболее общий подход к расчету распространения дисперсных примесей в водотоках — применение объемных уравнений гидродинамики. Для несжимаемой жидкости с частицами в рамках теории взаимопроникающих континуумов это уравнения Рейнольдса.

В расчетной схеме полагаем, что примесь обладает малой инерцией, осаждение частиц является установившемся. Для примеси $U = u$, $V = v$, $W = W_0$, где W_0 — скорость осаждения частиц (гидравлическая крупность). Ось Ox ориентирована по направлению течения в плоскости водной поверхности, ось Oz — перпендикулярно поверхности воды, ось Oy — перпендикулярно первым двум.



Расчетное уравнение, применяемое для вязкой жидкости при ее нестационарном изотермическом течении с малоинерционной примесью, имеет следующий вид [16]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial X} + \frac{\partial(hv)}{\partial Y} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -g \frac{\partial(z_b + h)}{\partial X} + \frac{1}{\rho h} \cdot \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial Y} + \\ + \frac{1}{\rho h} \cdot \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial Y} + \frac{\tau_{xz}(z_b + h) - \tau_{xz}(z_b)}{\rho h} + F_x^{Cor} \end{aligned}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} = -g \frac{\partial(z_b + h)}{\partial Y} + \frac{1}{\rho h} \cdot \frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial Y} + \\ + \frac{1}{\rho h} \cdot \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial Y} + \frac{\tau_{yz}(z_b + h) - \tau_{yz}(z_b)}{\rho h} + F_y^{Cor} \end{aligned}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial X} + v \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial Y} \right) + \frac{Q}{h}, \quad (4)$$

где t – время; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; $h(X, Y, t)$ – локальная глубина водотока; осредненные по глубине: $C(X, Y, t)$ – концентрация примеси, $u(X, Y, t)$, $v(X, Y, t)$ – составляющие горизонтальной скорости, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} – составляющие напряжений (вязких и Рейнольдса); $z_b(X, Y)$ – объемная поверхность дна; D_x , D_y – коэффициенты турбулентной диффузии вдоль осей координат для примеси; Q – изменение во времени объема или массы примеси при ее осаждении или взмыве.

При использовании программных продуктов для моделирования распространения примесей по водным объектам огромные ресурсы затрачиваются на создание базовой модели геометрии бассейна реки, включая описание поперечных сечений и других данных по ним, массивов гидрологической информации. Именно эти вопросы обсуждаются в обзорах [17–19]. При этом результаты расчетов могут существенно исказиться из-за неверного определения граничных условий и важнейших параметров, в частности коэффициента диффузии примеси и гидравлической крупности частиц.

В данной статье коэффициент диффузии твердых примесей в водотоках рассчитывается методом [20], гидравлическая крупность частиц – по формулам, предложенным в [21] и усовершенствованным в [22]. Применимость указанных формул подтверждена согласием результатов расчетов с многочисленными экспериментальными данными.

Для математической постановки задачи необходимо задать начальные и граничные условия. Условия по скоростям и глубинам задаем так же, как в [3; 4]. В качестве начальных условий по концентрации и в ис-

ходном сечении водотока задаем фоновое значение C_ϕ . Кроме того, должна быть задана интенсивность диффузного сброса вдоль береговой линии. Начальные и граничные условия для концентрации:

$$C(X, Y, 0) = C_\phi, C(0, Y, t) = C_\phi, D_y \left(\frac{\partial C}{\partial Y} \right)_{Y=0} = -ql, D_y \left(\frac{\partial C}{\partial Y} \right)_{Y=B} = Qp. \quad (5)$$

Безразмерные переменные и граничные условия обозначаем как

$$c = \frac{C - C_\phi}{C^* - C_\phi}, y = \frac{Y}{B}, x = \frac{X}{B}, ql = \frac{Ql}{U^* H^* B (C^* - C_\phi)},$$

$$qp = \frac{Qp}{U^* H^* B (C^* - C_\phi)}, q = \frac{Q}{U^* (C^* - C_\phi)}, \quad (6)$$

где U^*, H^* – средние значения скорости и глубины в исходном створе водотока соответственно; B – ширина водотока; C^* – характерная концентрация примеси (например, предельно допустимое значение по нормативам).

Массовый расход примеси в водотоке можно определить по формуле

$$G_c(X, t) = \iint_S u(X, Y, t) \cdot (C(X, Y, t) - C_\phi) dS. \quad (7)$$

Краевая задача решалась численным методом в среде *Mathcad*. На рисунках 1–3 представлены некоторые результаты расчета стационарной задачи для консервативной примеси ($Q = 0$). Видно, как при увеличении интенсивности бокового притока воды падает концентрация примеси в водотоке.

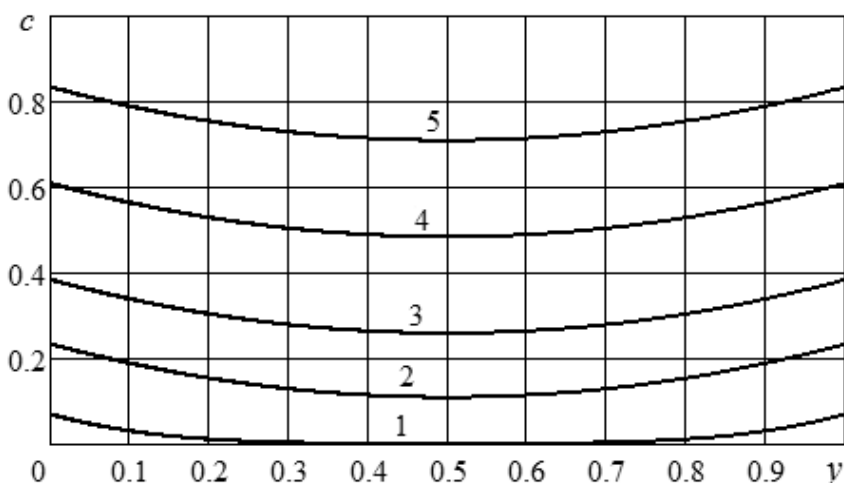


Рис. 1. Профили безразмерной концентрации примеси без осаждения при $a0 = 0,0015$, $ql = qp = 0,5$ без бокового притока воды:
 1 – $x = 10$; 2 – $x = 100$; 3 – $x = 200$; 4 – $x = 350$; 5 – $x = 500$

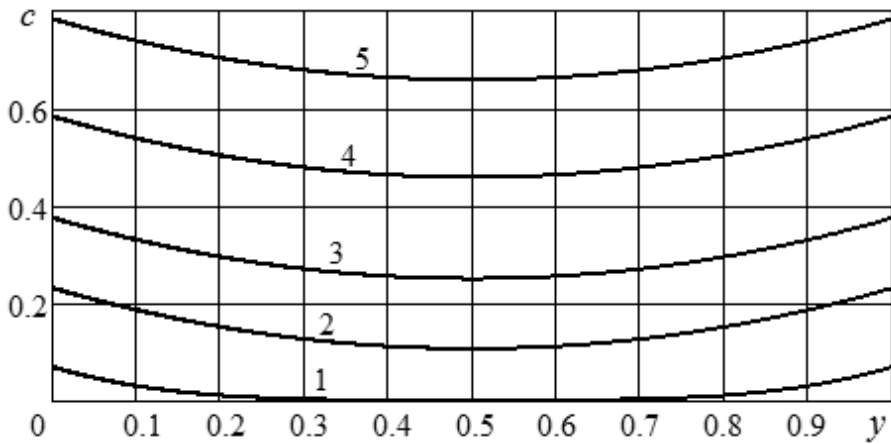


Рис. 2. Профили безразмерной концентрации примеси без осаждения (боковой приток воды 15 %) при $a_0 = 0,0015$, $ql = qp = 0,5$:
1 - $x = 10$; 2 - $x = 100$; 3 - $x = 200$; 4 - $x = 350$; 5 - $x = 500$

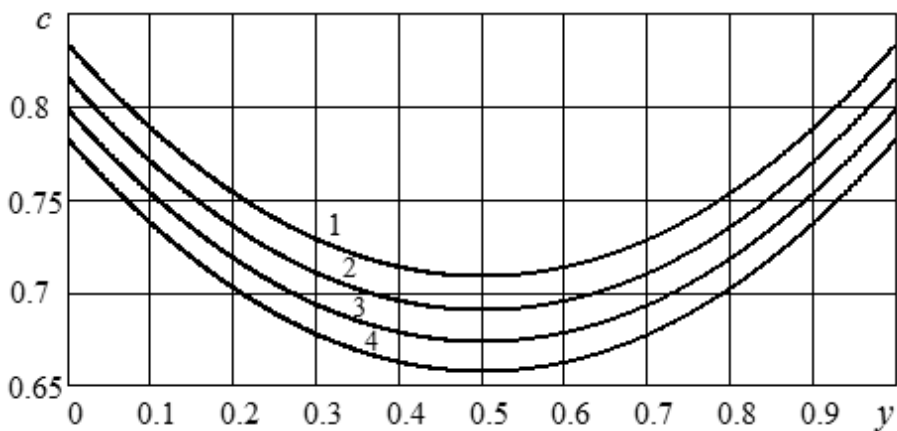


Рис. 3. Профили безразмерной концентрации примеси без осаждения при $a_0 = 0,0015$, $ql = qp = 0,5$ в створе $x = 500$:
1 - нет бокового притока; 2 - боковой приток 5%; 3 - 10%; 4 - 15%

На рисунках 4–7 представлены результаты численного решения стационарной задачи осаждающейся примеси; q – безразмерный параметр осаждения. На рисунке 5 диффузное загрязнение водотока поступает только с правого берега, и концентрация примеси ниже, чем на рисунке 4, где загрязнение поступает с обоих берегов.

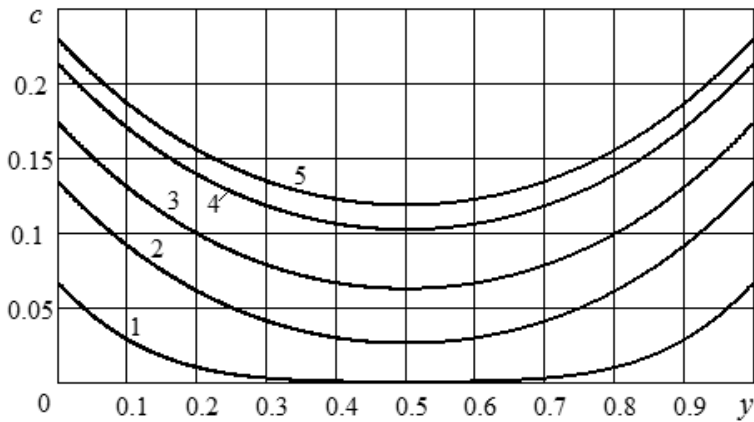


Рис. 4. Профили безразмерной концентрации осаждающейся примеси (боковой приток воды 10 %) при $a_0 = 0,0015$, $q_l = q_p = 0,5$, $q = 0,009$:
 1 - $x = 10$; 2 - $x = 50$; 3 - $x = 100$; 4 - $x = 200$; 5 - $x = 300$

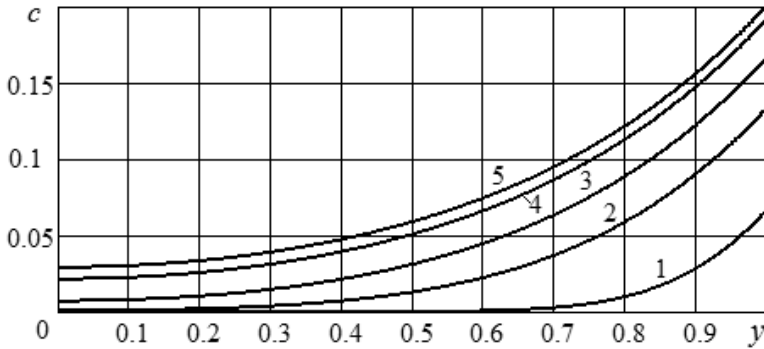


Рис. 5. Профили безразмерной концентрации осаждающейся примеси (боковой приток воды 10 %) при $a_0 = 0,0015$, $q_l = 0$, $q_p = 0,5$, $q = 0,009$:
 1 - $x = 10$; 2 - $x = 50$; 3 - $x = 100$; 4 - $x = 200$; 5 - $x = 300$

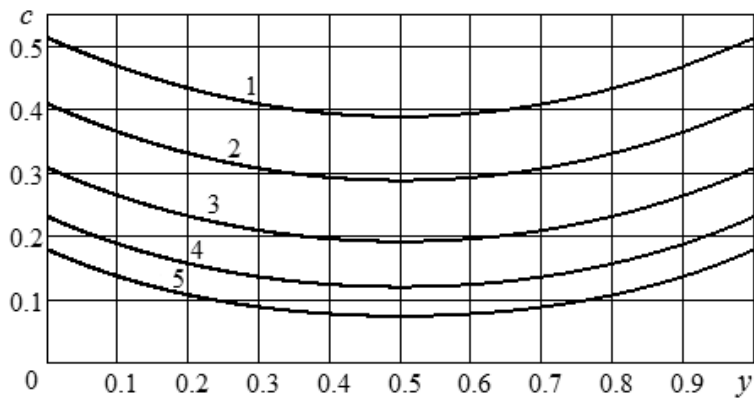


Рис. 6. Профили безразмерной концентрации осаждающейся примеси (боковой приток воды 10 %) при $a_0 = 0,0015$, $q_l = q_p = 0,5$ в створе $x = 300$:
 1 - $q = 0$; 2 - $q = 0,002$; 3 - $q = 0,005$; 4 - $q = 0,009$; 5 - $q = 0,014$



На рисунке 7 показано изменение безразмерного расхода примеси по течению в стационарном случае при различной интенсивности осаждения частиц:

$$G(x) = \int_0^x u(x, y) \cdot c(x, y) dy. \quad (8)$$

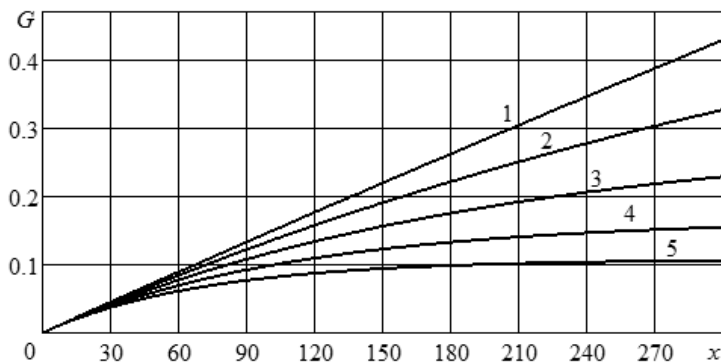


Рис. 7. Безразмерный расход примеси (боковой приток воды 10 %) при $a_0 = 0,0015$, $q_l = q_p = 0,5$:
1 – $q = 0$; 2 – $q = 0,002$; 3 – $q = 0,005$; 4 – $q = 0,009$; 5 – $q = 0,014$

По рисунках 6 и 7 видно, как уменьшается концентрация и расход взвешенной примеси при росте интенсивности осаждения. Это может происходить из-за увеличения размеров или плотности частиц.

Список литературы

1. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л., 1977.
2. Дружинин Н.И., Шишкин А.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. Л., 1989.
3. Lumborg U., Windelin A. Hydrography and Cohesive Sediment Modelling: Application to the Romo Dyb Tidal Area // J. Marine Syst. 2003. Vol. 38, iss. 3–4. P. 287–303.
4. Белолитецкий М.В., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных и донных наносов в речном русле // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9, №2. С. 9–25.
5. Григорян С.С. Об эволюции попавшей в реку массы консервативного загрязнения при ее движении по течению // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73, №6. С. 1036–1046.
6. Гусев А.Е. Применение одномерного уравнения конвективно-диффузионного переноса примесей в моделировании стационарных течений // Природообустройство. 2011. №2. С. 28–31.
7. Son M., Hsu T.-J. Idealized Study on Cohesive Sediment Flux by Tidal Asymmetry // Environ. Fluid Mech. 2011. Vol. 11, iss. 2. P. 183–202.
8. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Великанова М.Н. Расчет распространения загрязнения в реке Товарная // Вода: химия и экология. 2011. №8. С. 89–94.
9. Клинов А.В., Мухаметзянова А.Г., Алексеев К.А. Численное моделирование зон осаждения полидисперсной взвеси в малых водотоках // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, №19. С. 10–12.
10. Мухаметзянова А.Г., Алексеев К.А., Закиров Н.Н. Моделирование объемов и площадей зон загрязнения взвесью в водной среде // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, №21. С. 361–364.



11. *Chen J.-L., Hsu T.-J., Shi F. et al.* Hydrodynamic and Sediment Transport Modeling of New River Inlet (NC) under the Interaction of Tides and Waves // *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120, iss. 6. P. 4028–4047.
12. *Наумов В.А.* Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке // *Известия Калининградского государственного технического университета.* 2017. №44. С. 46–58.
13. *Великанов Н.Л., Наумов В.А.* Моделирование распространения взвешенных органических примесей в водотоках // *Вода: химия и экология.* 2017. №3. С. 3–8.
14. *Михайлов С.А.* Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул, 2000.
15. *Наумов В.А.* Математическое моделирование диффузного загрязнения водотоков // *Научные труды Дальрыбвтуза.* 2016. Т. 39. С. 49–53.
16. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды // *Методы расчета турбулентных течений.* М., 1984.
17. *Wang Q., Li S., Jia P. et al.* A Review of Surface Water Quality Models // *The Sci. World J.* 2013. Vol. 2013. 231768. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231768> (дата обращения: 14.11.2018).
18. *Gao L., Li D.* A Review of Hydrological/Water-Quality Models // *Front. Agr. Sci. Eng.* 2014. Vol. 1, iss. 4. P. 267–276.
19. *Sumita N., Kaur B.S.* Water Quality Models: a Review // *Int. J. Res. Granthaalayah.* 2017. Vol. 5, iss. 1. P. 395–398.
20. *Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И.* Расчет коэффициента диффузии твердых примесей в водотоках // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки.* 2017. №2. С. 75–81.
21. *Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В.* Осаждение частиц взвесей в воде // *Механизация строительства.* 2013. №7. С. 44–48.
22. *Кондратьев А.С., Ньв Т.Л., Швыдько П.П.* Расчет коэффициента гидравлического сопротивления твердых частиц произвольной формы // *Фундаментальные исследования.* 2016. №11. С. 286–292.

Об авторах

Николай Леонидович Великанов — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: monolit8@yandex.ru

Владимир Аркадьевич Наумов — д-р техн. наук, проф., Калининградский государственный технический университет, Россия.

E-mail: van-old@rambler.ru

Сергей Иванович Корягин — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

The authors

Prof. Nikolay L. Velikanov, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: monolit8@yandex.ru

Prof. Vladimir A. Naumov, Kaliningrad State Technical University, Russia.

E-mail: van-old@rambler.ru

Prof. Sergey I. Koryagin, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru