

ФОРМИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ

А.А. Кухленко, С.Е. Орлов, М.С. Василишин

Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, г. Бийск

Исследован процесс разрушения пленки жидкости при ее отрыве от поверхности ротора центробежного аппарата. Проанализировано влияние скорости вращения ротора, расхода и физико-химических свойств жидкостей, таких как вязкость, плотность и поверхностное натяжение на дисперсный состав капель при отрыве и разрушении пленки жидкости. Выполнено математическое описание процесса диспергирования и получены расчетные зависимости, позволяющие рассчитать диаметр получаемых капель. Установлено, что получению капель наименьшего диаметра способствует увеличение скорости вращения ротора и снижение объемного расхода жидкости.

Ключевые слова: центробежный массообменный аппарат, пленочное течение жидкости, дисперсный состав капель, отрыв пленки, диспергирование.

ВВЕДЕНИЕ

Проведение химических реакций основного органического синтеза является одним из основных направлений в химической технологии. Специфика их проведения заключается в решении первоочередной задачи обеспечения высокого уровня безопасности организации процесса. Одновременно с этим при реализации конкретного процесса необходимо обеспечивать оптимальные условия его проведения, при которых скорость и полнота протекания химической реакции будут максимальными. Если для обеспечения высокого уровня безопасности проведения реакции необходимо обеспечивать отведение избыточного количества тепла выделяемого в зоне реакции, то для увеличения эффективности ее протекания – необходимо создавать такие условия, при которых поверхность контакта вступающих в реакцию компонентов будет максимальной. Также для повышения эффективности работы реактора толщины гидродинамического и диффузионного слоев требуется снижать, что также приводит к росту тепловыделения, а, следовательно, к снижению безопасности организации химико-технологического процесса. Решение такой задачи возможно путем создания специализированных устройств и разработки надежных методик расчета их работы. В качестве перспективного оборудования в малотоннажном производстве при проведении реакций органического синтеза в системе жидкость–жидкость рассматриваются центробежные массообменные аппараты (ЦМА). Принцип работы данных устройств основан на получении пленки жидкости при ее течении по внутренней поверхности ротора. В зависимости от режимных параметров организации процесса течение пленки по поверхности ротора может иметь как стационарный, так и нестационарный характер. При нестационарном характере течения пленки на ее поверхности возникают волны, а в пре-

дельном случае происходит отрыв жидкости от поверхности ротора и разрушение пленки. При разрушении пленки жидкости образуются капли, в результате чего происходит значительное увеличение контакта фаз. Изучение условий возникновения волн на поверхности пленки, механизма ее разрушения и определение дисперсного состава образующихся капель жидкости представляет большой как научный, так и практический интерес, и, несомненно, является важным направлением в химической технологии, а исследованием направленным на установление математических закономерностей протекания данных процессов – актуальным.

Целью настоящей работы является изучение механизма разрушения пленки жидкости при ее отрыве от криволинейной поверхности ротора, определение дисперсного состава получаемых капель, а также анализ математических закономерностей и определение наиболее значимых факторов оказывающих значительное влияние на процесс диспергирования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследование явления возникновения на поверхности пленки жидкости волн при ее течении по вращающейся поверхности изучались как отечественными, так и зарубежными учеными. Значительный вклад в развитие теоретического описания механизма образования капель при дроблении жидкости были сделаны в работах [1,2]. Так в [1] были выделены три основных механизма разрушения капли: прямой распад; расщепление связок капель и измельчение пленки вблизи вращающейся кромки ротора. В работе [2] были показаны различия в механизмах дробления капель жидкости в системе жидкость–жидкость и газ–жидкость. Значительный вклад в изучение вопроса распада связки капель при отрыве пленки жидкости от поверхности вращающегося диска были выполне-

ны в работах [3,4]. Авторами предложена математическая модель течения пленки жидкости по поверхности вращающегося диска, и представлено математическое описание процесса распада пленки на капли при ее отрыве от диска. В работе [5] выполнен анализ начальной стадии образования нестационарной пленки жидкости на основе численного решения полных уравнений Навье-Стокса. Показана начальная картина формирования волн на вращающемся диске. В работе [6] проанализированы условия возникновения нестационарного течения пленки по поверхности вращающегося ротора и установлены границы областей устойчивого течения.

Таким образом, можно отметить, что к настоящему времени условия возникновения волн на вращающейся криволинейной поверхности или диска изучены достаточно хорошо. Интерес представляет механизм отрыва пленки жидкости от вращающейся поверхности ротора и процесс формирования капель дисперсной фазы.

В качестве основы для численного расчета дисперсного состава капель, формируемого в результате отрыва пленки жидкости от вращающейся поверхности ротора, воспользуемся математическими моделями [7,8]. Физическое представление механизма дробления пленки при ее отрыве от вращающейся поверхности ротора основано на образовании на начальном этапе связок капель жидкости, которые во время движения в газовой среде разрушаются с образованием более тонкого дисперсного состава.

Важнейшими параметрами, лежащими в основе математических моделей [7,8], являются радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости течения и толщина пленки в точке ее отрыва от поверхности вращения, а также физико-химические свойства жидкостей.

В качестве основы для построения математической модели разрушения пленок различных жидкостей проводили на основе конструкции ЦМА [9], конструктивные особенности которого ранее были приведены в работе [10]. В работах [10,11] проведена оценка влияния скорости вращения ротора и расхода на составляющие вектора скорости и толщину пленки модельных жидкостей, поэтому данные работ [10,11] использовались в качестве основы для численного расчета выполненного в настоящей работе.

Для определения дисперсного состава капель необходимо определить амплитуду волн, возникающих на поверхности пленки жидкости при ее удалении от оси вращения на расстояние r .

При отрыве пленки жидкости от поверхности ротора, как было отмечено ранее, образуется связка капель жидкости, эквивалентный диаметр которой определяется по выражению:

Амплитуда волн на поверхности пленки определяется как [7,8]:

$$\beta_r = -2 \frac{\mu}{\rho \cdot \tanh\left(\frac{kH_r}{2} + \frac{\rho_g}{\rho}\right)} \left\{ k^2 \tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) + \left[4 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2 k^4 \tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) - \left(\frac{\rho_g}{\rho}\right)^2 U_r^2 k^2 - \left[\tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) + \frac{\rho_g}{\rho} \right] \left[\left(\frac{\sigma k^3}{\rho} - \frac{\rho_g U_r^2 k^2}{\rho}\right) \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

где β_r – амплитуда волн, возникающих в пленке жидкости на удалении r от оси вращения, м; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; ρ , ρ_g – плотность жидкости и газа, соответственно, кг/м³; k – волновое число, м⁻¹; H_r – толщина пленки жидкости на удалении r от оси вращения, м; U_r – радиальная составляющая скорости пленки жидкости на удалении r от оси вращения, м/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе жидкой и газовой фаз, Н/м.

Зависимость амплитуды волны в точке отрыва пленки жидкости от поверхности ЦМА графически представлена на рис. 1.

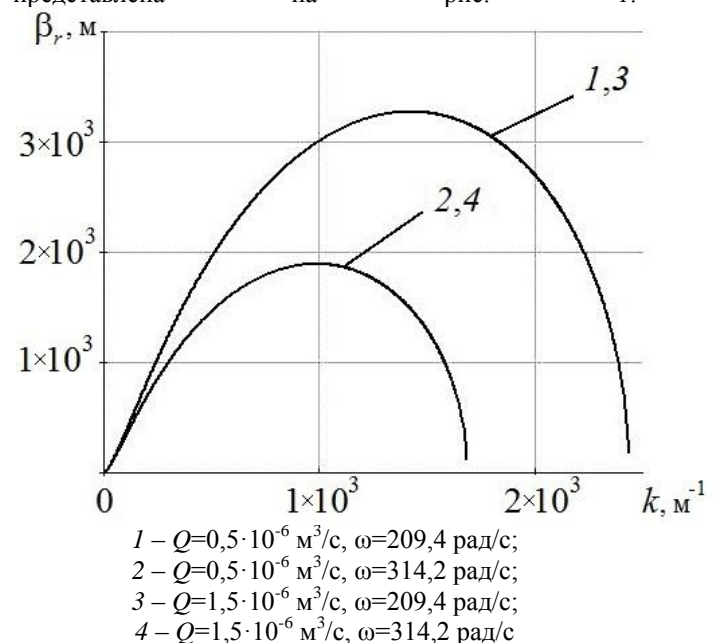


Рис. 1. Зависимость амплитуды волн от волнового числа в точке отрыва пленки воды от поверхности ротора при различных угловых скоростях вращения ротора ω и расходе жидкости Q

$$d_l = \left(\frac{4H_r}{k_{opt}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

В выражении (2) оптимальное волновое число k_{opt} определяется максимумом функции β_r .

При последующем разрушении связки на отдельные капли критерии подобия данного процесса в точке отрыва жидкости от поверхности ротора определяются следующим образом:

критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{U_r d_l \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где U_r – средняя скорость течения пленки жидкости на удалении r от оси вращения, м/с;

критерий Вебера:

$$We = \frac{\rho U_r^2 d_l}{\sigma}; \quad (4)$$

критерий Онезорге:

$$Oh = \frac{We^{1/2}}{Re} = \frac{\mu}{(\rho \sigma d_l)^{1/2}}. \quad (5)$$

Оптимальная длина волны связки капель жидкости λ_{opt} составляет [8]:

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2\pi d_l (1 + 3Oh)}. \quad (6)$$

Диаметр капель, образующийся при разрушении связки, будет определяться как [8]:

$$d = \left[\frac{3}{2} \lambda_{opt} d_l^2 \right]^{1/3}. \quad (7)$$

Реализация математической модели позволяет установить влияние режимных параметров обработки модельных сред в ЦМА на дисперсный состав получаемых капель, формируемых в результате отрыва пленки жидкости от поверхности ротора.

Наглядное представление влияния режимных параметров обработки, таких как скорость вращения ротора и расход жидкости, представлено на рис.2.

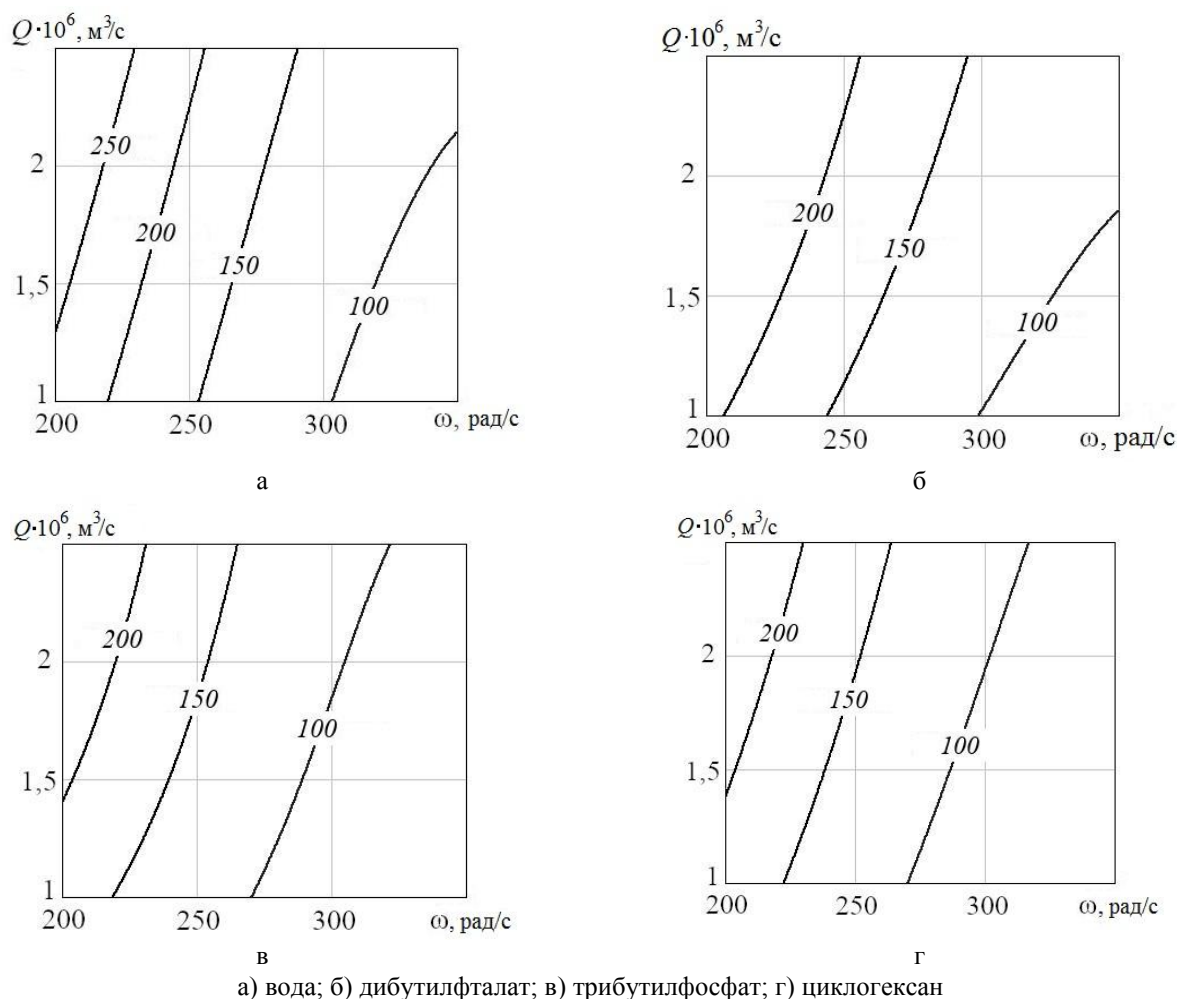


Рис. 2. Зависимость изменения дисперсного состава капель d (мкм) модельных сред при разрушении пленки жидкости в зависимости от скорости вращения ротора и объемного расхода

Физико-химические свойства модельных жидкостей приведены в [12].

Из рис. 2 видно, что наименьший диаметр капель достигается при уменьшении расхода жидкости Q и увеличении угловой скорости вращения ротора ω .

Влияние физико-химических свойств модельных жидкостей (плотности, вязкости и поверхностного натяжения) также оказывает значительное влияние на дисперсный состав получаемых капель. Оценку влияния данных параметров можно осуществить только на основе комплексного рассмотрения результатов, полученных как в работах [10, 11], так и настоящей работы. Это связано с тем, что физико-химические свойства оказывают значительное влияние как на гидромеханические закономерности течения пленки, которые рассматривались в работах [10,11], так и на механизм образования капель при отрыве и разрушении пленки. В результате проведенного анализа как закономерностей течения пленки жидкости по поверхности ротора, так и закономерностей диспергирования установлено, что увеличение плотности жидкости и поверхностного натяжения приводит к снижению дисперсного состава капель. Повышение вязкости жидкости, напротив, способствует росту характерного размера получаемых капель. Полученный результат хорошо согласуется с результатами других авторов [3-5, 7-8], что подтверждает достоверность результатов настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлены основные закономерности, определяющие дисперсный состав получаемых капель при отрыве пленки жидкости от поверхности ротора и ее последующем разрушении. Показано, что для уменьшения характерного размера капель жидкости необходимо увеличивать скорость вращения ротора и снижать объемный расход жидкости. На основе комплексного анализа закономерностей течения пленки жидкости по поверхности ротора и процесса разрушения связей жидкости установлено влияние плотности, вязкости и поверхностного натяжения на дисперсный состав получаемых капель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hince J.O., and H.J. Milborn, "Atomisation of liquid by means of a rotating cup". *J. Appl.Mech.*, 1950. Vol. 17. 145-153.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959.
3. Dombrowski N., and W.R. Johns, "The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets," *Chem. Eng. Sci.*, 1963. Vol. 18, pp. 203-214.
4. Clark C.J, and N. Dombrowski, "The aerodynamic instability and disintegration of inviscid liquid sheets," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1972, 329A, pp. 467-478.
5. Matsumoto Y., Ohara T. Teruya I. et al. Liquid film formation on a rotating disk (numerical analysis at the initial stage). *JSME Int. J.* 1989. Vol. 32. P. 52-56.
6. Могилевский, Е.И. Течения тонких пленок вязкой жидкости по криволинейным вращающимся поверхностям / Е.И. Могилев-

ский, В.Я. Шкадов [Текст] // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2009. – № 2. – С.18-32.

7. Liu J.X. B., YuQ., Q. Qin, "Numerical study on film disintegration by centrifugal atomization using rotating cup," *Powder Metallurgy*, 2013, Vol. 56, № 4, pp. 288-294.

8. Deng H., and H. Ouyang, "Vibration of spinning disks and powder formation in centrifugal atomization," *Proc. R. Soc. A.*, 2011, № 467, pp. 361-380.

9. Пат. 2663038 Российская Федерация, МПК⁷ B01J 8/10 ; B01J 14/00 ; B01F 5/00 ; B01F 7/16. Центробежный массообменный аппарат для систем «жидкость–жидкость» [Текст] / Сакович Г.В., Василишин М.С., Кухленко А.А., Иванов О.С., Карпов А.Г., Иванова Д.Б., Орлов С.Е.; заявитель и патентообладатель Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН 2017142070; заявл. 01.12.17; опубл. 01.08.18, Бюл. № 22 – 3 с.: ил.

10. Кухленко, А.А. Расчет параметров течения пленки жидкости по рабочей поверхности центробежного массообменного аппарата [Текст] / А.А. Кухленко, С.Е. Орлов, М.С. Василишин // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 145-150

11. Кухленко, А.А. Влияние физико-химических свойств жидкости на закономерности пленочного течения в роторе центробежного массообменного аппарата / А.А. Кухленко, С.Е. Орлов, М.С. Василишин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – № 4. – с. 147-152.

12. Рабинович, В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. [Текст] / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – Л.: Химия. – 1991. – 432 с.

Кухленко Алексей Анатольевич – старший научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, тел. (3854)301869, e-mail: ak-79@rambler.ru.

Орлов Сергей Евгеньевич – научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, тел. (3854)301869, e-mail: seppp@mail.ru.

Василишин Михаил Степанович – главный научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, тел. (3854)301869, e-mail: admin@ipcet.ru.

FORMATION OF POLYSIZED DROPLETS UPON BREAKUP OF LIQUID FILM IN CENTRIFUGAL MASS-TRANSFER APPARATUS

A.A. Kukhlenko, S.E. Orlov, M.S. Vasilishin

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk 659322, Russia

Abstract—The breakup process of liquid film when it breaks away from the rotor of a centrifugal apparatus was studied. The effects of the rotor speed, flowrate and physicochemical properties of liquids, such as viscosity, density and surface tension, on the disperse composition of droplets were evaluated. The dispersion process was mathematically described, and calculated dependences that enable the estimation of the diameter of the resultant droplets were obtained. The origination of droplets of the smallest diameter was found to be favored by the increased rotor speed and decreased volumetric flowrate.

Index terms: centrifugal mass-transfer apparatus, liquid film flow, droplet disperse composition, film breakaway, dispersion

REFERENCES

1. Hince J.O., and H.J. Milbourn, "Atomisation of liquid by means of a rotating cup". *J. Appl. Mech.*, 1950. Vol. 17. 145-153.
2. Levich V.G. *Physicochemical hydrodynamics*. – M.: Gos. Izdatel'stvo Fiziko-Matematicheskoy Literatury, 1959.
3. Dombrowski N., and W.R. Johns, "The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets," *Chem. Eng. Sci.*, 1963. Vol. 18, pp. 203-214.
4. Clark C.J., and N. Dombrowski., "The aerodynamic instability and disintegration of inviscid liquid sheets," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1972, 329A, pp. 467-478.
5. Matsumoto Y., Ohara T. Teruya I. et al. Liquid film formation on a rotating disk (numerical analysis at the initial stage). *JSME Int. J.* 1989. Vol. 32. P. 52-56.
6. Mogilevskiy, E.I. The flow of thin films of a viscous liquid over curvilinear rotary surfaces / E.I. Mogilevskiy, V.Ya. Shkadov [Text] // *Fluid Dynamics*. – 2009. –no. 2. – pp.18-32.
7. Liu J.X. B., YuQ., Q. Qin, "Numerical study on film disintegration by centrifugal atomization using rotating cup," *Powder Metallurgy*, 2013, Vol. 56, № 4, pp. 288-294.
8. Deng H., and H. Ouyang, "Vibration of spinning disks and powder formation in centrifugal atomization," *Proc. R. Soc. A.*, 2011, № 467, pp. 361-380.
9. Pat. 2663038 Russian Federation, IPC⁷ B01J 8/10 ; B01J 14/00 ; B01F 5/00 ; B01F 7/16. A centrifugal mass-transfer apparatus for liquid-liquid systems [text] / Sakovich G.V., Vasilishin M.S., Kukhlenko A.A., Ivanov O.S., Karpov A.G., Ivanova D.B., Orlov S.E.; applicant and patent-holder IPCET SB RAS 2017142070; applied 01.12.17; published 01.08.18, Bull. No. 22 – 3 p.
10. Kukhlenko, A.A. The estimation of liquid film flow over the working surface of the centrifugal mass-transfer apparatus [Text]/ A.A. Kukhlenko, S.E. Orlov, M.S. Vasilishin // *Polzunovskiy Vestnik*. – 2017. – no. 4. – pp. 145-150.
11. Kukhlenko, A.A. The effect of physicochemical properties of liquid on film flow patterns in the rotor of a centrifugal mass-transfer apparatus / A.A. Kukhlenko, S.E. Orlov, M.S. Vasilishin // *South-Siberian Scientific Bulletin*. – 2018. – no. 4. – pp. 147-152.
12. Rabinovich, V.A., Khavin Z.Ya. *Brief Chemistry Reference Book*. [Text] / V.A. Rabinovich, Z.Ya. Khavin. – L.: Khimiya. – 1991. – 432 p.

Kukhlenko Alexey Anatolyevich – Senior Research Scientist at the Laboratory of Chemical Engineering Processes and Apparatuses, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301869, e-mail: ak-79@rambler.ru.

Orlov Sergey Evgenyevich – Research Scientist at the Laboratory of Chemical Engineering Processes and Apparatuses, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301869, e-mail: ceppp@mail.ru.

Vasilishin Mikhail Stepanovich – Chief Research Scientist at the Laboratory of Chemical Engineering Processes and Apparatuses, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301869, e-mail: admin@ipcet.ru