

## Раздел IV. Системы информационного обеспечения принятия решений

УДК 629.73.02; 681.5.01

А.М. Шевченко, Б.В. Павлов, Г.Н. Начинкина

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ТОРМОЖЕНИЯ САМОЛЕТА

*Разработаны алгоритмические методы оценки текущего и прогнозирования будущего движения самолета. Методы основаны на энергетическом подходе к управлению полетом воздушных транспортных средств. Уравнение баланса энергий обобщается на режимы движения по взлетно-посадочной полосе. Уравнение описывает процесс изменения полной энергии самолета на всей траектории, включая впередилежащий участок. Длина этого участка вычисляется исходя из условий достижения требуемого конечного энергетического состояния. На этапе приземления найдено уравнение прогнозной длины тормозного пути. С целью улучшения правдоподобия прогноза предлагается коррекция алгоритмов прогнозирования. Приведены результаты моделирования режимов экстренного торможения пассажирского самолета с различными массами при отказе двигателя.*

*Управление полетом; энергетический подход; прогнозирование.*

A.M. Shevchenko, B.V. Pavlov, G.N. Nachinkina

### FORECASTING OF THE AIRCRAFT BRAKING TRAJECTORY

*Algorithmic methods for evaluating current and predicting future movement of the aircraft are developed. The methods are based on the energy approach to flight control of aircraft. The energy balance equation is generalized to the runway modes. The equation describes the process of change in the total energy of the aircraft on the entire trajectory, including ahead segment. The length of this segment is calculated from the conditions to achieve the desired final energy state. At the landing stage the equation for predicting the braking distance was determined. To improve the forecast likelihood the correction of forecasting algorithms was proposed. The results of simulation of the emergency braking regimes of the passenger aircraft with various masses with the engine failure are given.*

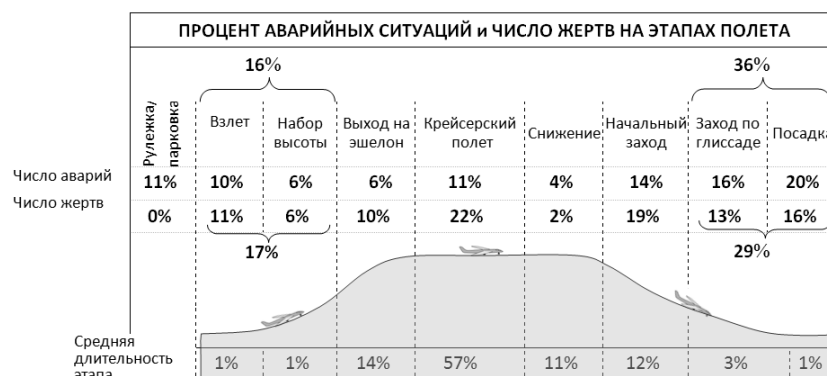
*Flight control; energy approach; forecasting.*

**Введение.** Проблемы безопасности и безаварийности воздушных перевозок всегда находились в центре внимания операторов и конструкторов самолета.

Безопасность эксплуатации воздушных перевозок оценивается количеством летных происшествий (ЛП) различных категорий. Статистика нештатных событий в авиации за последние годы неумолимо отмечает устойчивое процентное соотношение аварийных и катастрофических ЛП по этапам полета. Фирмой Boeing ежегодно публикуется аналитический обзор ЛП в коммерческой мировой авиации. Последний выпуск состоялся в 2012 г. [1]. Ниже в табл. 1 приведены обобщающие данные из этого обзора по распределению ЛП за период 2002–2011 гг.

Сравнение с ранее опубликованными данными [2] показывает практически неизменное соотношение доли аварийных ЛП на количество вылетов и на час полета. Заметна лишь одна неблагоприятная тенденция – число катастрофических посадок из общего числа катастроф увеличилось с 25 до 29 %, в том числе на финальной стадии пробега по взлетно-посадочной полосе (ВПП) с 12 до 16 %.

Таблица 1



Наземные участки полета, как это предписывается наставлениями и руководствами по летной эксплуатации, в подавляющем большинстве выполняются в режиме ручного управления. Высокая аварийность на взлетно-посадочных фазах полета при их относительной длительности всего 1 % от средней длительности полетов, свидетельствует о том, что человеческий фактор является основной причиной ЛП. Отмечается, что серьезными предпосылками к ошибочным действиям экипажа являются недостаточность или отсутствие информации о полетной ситуации, что выражается понятием «ситуационная осведомленность». Вопросы улучшения ситуационной осведомленности приобретают все большую остроту по мере интенсификации воздушных перевозок и расширения границ допустимых условий эксплуатации воздушных судов.

Работы по бортовому мониторингу режимов взлета и посадки активно проводятся в ведущих российских и зарубежных авиационных компаниях [3–9].

Планирование взлетных и посадочных маневров обычно производится на основе номинальных характеристик воздушного судна и априори известных погодных условий или состояния ВПП. Такое планирование не может предотвратить авиационных происшествий в нештатных ситуациях. Причинами таких ситуаций бывают отказ двигателя, превышение допустимой массы, неисправность тормозов, загрязнение ВПП или отклонение погодных условий от ожидаемых. Несмотря на многие успешные методические разработки, такие как [10–12], проблема информационной поддержки пилота далека от своего решения.

В наших предыдущих работах [13–15] предложены методы формирования независимого объективного образа полета и прогнозирования будущего сценария полета. Методологической базой разработок является энергетический подход к управлению движением. Концептуально основная идея работы находится в русле новых взглядов на управление в классе терминальных алгоритмов с фиксированной функцией цели.

В данной работе находятся условия достижимости конечного состояния на режимах торможения при различных состояниях ВПП и в условиях отказа двигателя. С целью повышения достоверности прогноза введена корректировка алгоритмов прогнозирования.

Было выполнено моделирование экстренных торможений пассажирского самолета в различных вариантах загрузки. Приводятся результаты прогнозирования дистанции торможения самолета.

**1. Обобщение энергетического подхода.** Методы оценивания текущего и прогнозирования будущего движения воздушного судна базируются на энергетическом подходе к управлению полетом летательных аппаратов [16, 17]. С позиций

этого подхода движение ЛА рассматривается в терминах его полной энергии и её составляющих – потенциальной и кинетической. Количественные соотношения между источниками и потребителями энергии в системе объектов «летательный аппарат – силовая установка – внешняя среда» выражены в форме уравнения баланса энергий:

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{db} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^w.$$

Уравнение записано в форме приращений удельной энергии движения:

$$H_E(*) = E(*)/mg = h + V^2/2g.$$

Удельная энергия имеет размерность метров, поэтому она называется также энергетической высотой. Здесь  $\Delta H_E$  – приращение энергетической высоты,  $\Delta H_E^{db}$  – удельная работа двигателя,  $\Delta H_E^D$  – затраты энергии на преодоление всех внешних сил – лобового сопротивления, тормозной системы, трения и др.,  $\Delta H_E^w$  – работа ветра. Для каждого члена уравнения баланса энергий в работе [16] получены интегральные выражения. Как видно из структуры уравнения, в нем представлены все силы, возникающие на воздушных участках траектории полета.

Однако на режимах движения по ВПП присутствуют силы сопротивления со стороны опор шасси. Поэтому уравнение баланса энергий было обобщено на наземные режимы путем введения нового члена  $\Delta H_E^b$ , отражающего процесс поглощения энергии на преодоление механических сил сопротивления:

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{db} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^b + \Delta H_E^w.$$

Новый член представлен нами в форме:

$$\Delta H_E^b = \int_{t_1}^{t_2} V k_b dt,$$

где  $k_b$  – обобщенный коэффициент торможения (braking factor), зависящий от текущего коэффициента сцепления колес (adhesion factor) с покрытием ВПП и степени обжатия тормозных колодок колес.

**2. Алгоритм прогнозирования дистанции безопасного торможения.** В пределах наземного участка траектории, т.е. на этапах пробежки после приземления или разбега перед взлетом, могут возникать ситуации, требующие введения режима экстренного торможения.

Причинами для экстренного торможения могут быть:

- ◆ ошибки пилотирования вследствие плохих метеоусловий (ветер, низкая облачность, плохая видимость);
- ◆ состояние покрытия ВПП (наличие воды, снега, льда, песка и др.);
- ◆ внезапное загромождение ВПП посторонними объектами или её повреждение;
- ◆ отказы оборудования, организованные угрозы, нештатные или вынужденные маневры и др.

В таких ситуациях существует опасность выкатывания за пределы ВПП. В условиях дефицита времени необходимо оценить возможность экстренного торможения и останова в пределах ВПП или ухода на второй круг.

Процесс посадки схематично показан на рис. 1, где обозначено:  $L_{touch}$  – дальность до точки касания,  $V_{touch}$  – скорость в точке касания.

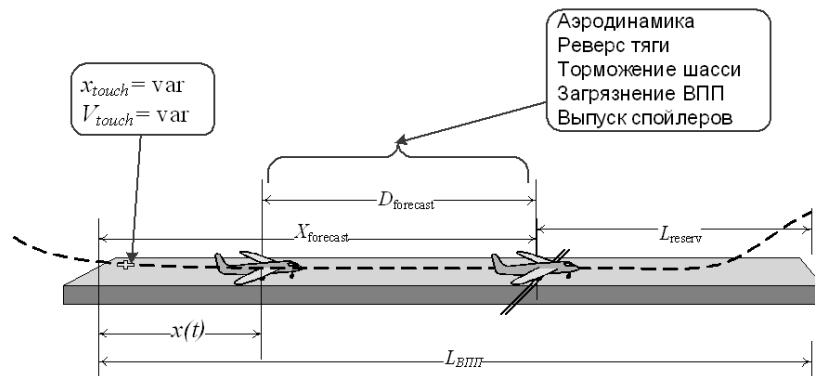


Рис. 1. Основные факторы процесса торможения

Прогнозную длину тормозного пути определим как расстояние, на котором энергия (или скорость) движения будет погашена от текущей до некоторой малой величины  $\varepsilon$ .

$$S_{\text{forecast}} = S(t) \Big|_{V(t) \leq \varepsilon}.$$

Прогнозируя этап торможения для самого общего случая, т.е. с этапа захода на посадку, будем учитывать высоту полета. Полная энергия движения на текущий момент равна

$$E(t_0) = m \frac{V(t_0)^2}{2} + mgh(t_0).$$

Величина энергии в процессе движения определяется работой внешних сил на траектории  $S$ :

$$E(t)_{\text{forecast}} = m \frac{V(t)^2}{2} + mgh(t) + S_{\text{forecast}} \sum_i F_i(t).$$

В число внешних сил  $F_i$  входят: тяга двигателя  $P$  (в том числе реверсивная), аэродинамические силы  $D$ , соответствующие текущей конфигурации, и силы торможения  $F_{br}$ . Последние зависят от коэффициента сцепления колес с покрытием, выпуска тормозных щитков и парашютов, а также от энергоемкости тормозной системы.

Прямое измерение или получение оценок всех действующих сил на борту является практически неразрешимой задачей. Влияние равнодействующей всех этих сил проявляется в виде ускорения. В предлагаемой методике сумма действующих сил естественным образом вычисляется через продольное ускорение  $a(t)$ :

$$\sum_i F_i(t) = ma(t),$$

которое на борту обычно определяется по измеряемой перегрузке  $a(t) = gn_x(t)$ .

Следовательно, реакцию внешних сил можно вычислять по измеренной перегрузке. С учетом критерия останова  $V(t) \leq \varepsilon$  определяем прогнозную длину тормозного пути:

$$D_{\text{form}} = S(t)_{\text{forecast}} = 0,5(V(t)^2 - \varepsilon^2) / gn_x(t).$$

Имея оценку предельной дальности останова самолета, в поле зрения пилота может быть сгенерировано сообщение о резерве дистанции безопасного торможения:

$$D(t)_{\text{reserv}} = L_{\text{ВПП}} - x(t) - D_{\text{form}}.$$

Такое сообщение, безусловно, полезно для принятия пилотом решения об экстренном торможении или в случае невозможности – об уходе на второй круг.

**3. Коррекция прогноза торможения.** Очевидно, что информативность и приемлемость прогноза для повышения ситуативной осведомленности тем выше, чем более достоверны прогнозные оценки параметров движения по отношению к их реальным значениям.

Основной прогнозируемой величиной является длина тормозного пути  $D_{\text{torm}}$  от текущего положения самолета на ВПП до точки, в которой скорость будет погашена до скорости руления  $V_r$ .

Наиболее простой и очевидный прогноз дистанции торможения вычисляется в процессе движения самолета по ВПП, основываясь на текущих энергетических характеристиках и действующих силах. Все силы в процессе движения меняются или по какой-либо программе (в соответствии с РЛЭ), или по непредвиденным обстоятельствам (изменение сцепления, отказы двигателя или тормозной системы, наличие ветра и др.). Поэтому прогноз не может совпадать с реальным процессом и всегда содержит погрешность или неопределенность. Для повышения достоверности прогноза в данной работе предлагается метод коррекции алгоритмов прогнозирования. Этот метод учитывает стандартные или типовые сценарии развития ситуации на пробеге и инструкции по использованию имеющихся технических средств торможения, включая тормозную силу шасси, реверс тяги, выпуск спойлеров.

Коррекция определялась на основе статистической обработки результатов модельных экспериментов. Было выполнено большое число модельных экспериментов на множестве условий пробега. Это множество включало разброс посадочных масс, скоростей и коэффициента сцепления. Кроме того, имитировался отказ двигателя. Все эксперименты проводились на полной сертифицированной модели серийного лайнера ТУ-204.

Динамическая модель самолета содержала модель двигателя. Эквивалентная постоянная времени равна 1,5 с. Отказ одного из двигателей имитировался уменьшением суммарной тяги на половину (на 50 %). Для вычисления прогнозной длины  $D_{\text{torm}}$  и коэффициента коррекции предполагалась доступность необходимых входных координат.

Многие (большинство) процедуры по использованию средств торможения выполняются в зависимости от скорости. Поэтому в прогнозе дистанции торможения основным аргументом была принята именно скорость.

Повышение достоверности прогноза в нашей работе достигается введением в алгоритм прогнозирования масштабного коэффициента коррекции результатов прогнозирования  $k_{\text{cor}}$ , полученных по текущим параметрам движения воздушного судна. Итак, скорректированная длина тормозного пути находится в виде

$$D_{\text{torm\_cor}} = k_{\text{cor}} \cdot D_{\text{torm}}.$$

Наиболее сильное влияние на динамику торможения оказывают реверс тяги и отказ двигателя. При этом суммарная тяга восстанавливается в течение 3–5 с. В связи с этим было решено учитывать только режим реверса – промежуточный или максимальный. Поэтому в алгоритме коррекции производится переключение коэффициента коррекции одновременно с командой на изменение реверса

$$k_{\text{cor}} = \begin{cases} 1,49k_b^2 - 3,14k_b + 2,62, & \text{если reverse}=\text{max} \\ -0,98k_b^3 + 3,08k_b^2 - 2,53k_b + 1,82, & \text{если reverse}=\text{min} \end{cases}$$

**4. Модельные испытания алгоритма прогнозирования дистанции торможения.** Основными целями моделирования процесса торможения были:

- ◆ демонстрация работоспособности алгоритма коррекции на множестве штатных и нештатных ситуаций;
- ◆ получение оценок погрешностей прогноза.

На рис. 2 приведены данные по прогнозированию тормозного пути самолета ТУ-204 с максимальным, минимальным и номинальным весом для разных коэффициентов сцепления в функции начальной скорости торможения. Результаты для промежуточных значений коэффициента сцепления  $K_{сц}$  легко интерполируются.

Видно, что при плохом состоянии ВПП, таком как обледенение на всей длине или мокром снеге, дистанция торможения может достигать 2500 м. Эти расчеты должны учитываться при выполнении захода на посадку на аэродромы с короткой ВПП.

Включение алгоритмов прогнозирования в состав бортовой информационной системы зависит в первую очередь от степени доверия эксплуатантов к методике прогнозирования. Для подтверждения правдоподобия прогноза были проведены специальные исследования погрешностей прогнозирования по отношению к реальным состояниям самолета.

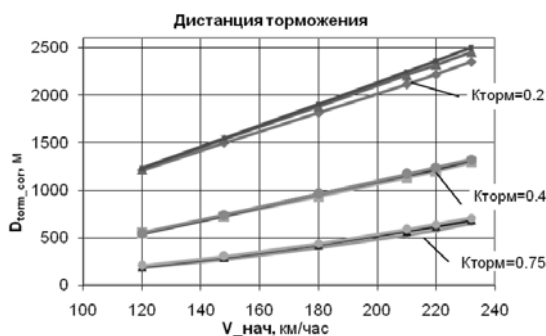


Рис. 2. Прогноз дистанции торможения на пробеге

Мерой правдоподобия прогноза была принята усредненная погрешность расчета текущей дистанции торможения по отношению к реальному процессу.

Чтобы иметь возможность сравнения прогнозных оценок процесса с реальным процессом, моделирование выполнялось дважды. В первом прогоне регистрировался реальный полет и фиксировалась конечная точка, а во втором вычислялась прогнозная текущая дальность.

На рис. 3 показан пример эффективности коррекции.

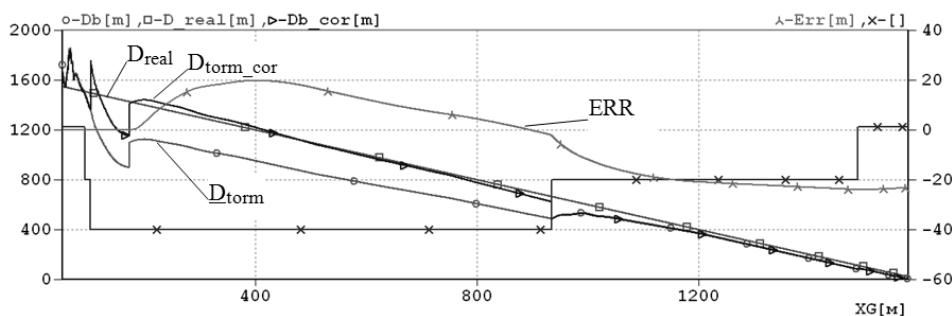


Рис. 3. Эффективность коррекции прогноза

Условия моделирования были следующие: вес – 105 т, коэффициент торможения – 0,4, первоначальная скорость полета – 210 км/ч, отказ двигателя на 3-й секунде. Графики показывают прогноз дистанции торможения без коррекции ( $D_{\text{form}}$ ) и с коррекцией ( $D_{\text{form\_cor}}$ ). В последнем случае средняя ошибка прогноза дальности (ERR) по отношению к фактической дальности ( $D_{\text{real}}$ ) находится в пределах от –22 м до +22 м на протяжении всей траектории торможения. Был выполнен большой объем модельных испытаний алгоритма прогнозирования с коррекцией в самых неблагоприятных условиях. Ошибки прогноза не превышали 50–70 м.

Отметим, что были смоделированы условия торможения при экстремально низком коэффициенте сцепления и отказе двигателя. В итоге было установлено, что с отказавшим двигателем при задействовании всех средств торможения самолет с максимальным и минимальным весом способен затормозить от посадочной скорости до скорости рулежки на большинстве современных аэродромов.

**Заключение.** Разработаны методы прогнозирования достижимости терминальных состояний на этапах взлета и посадки самолетов. Методологической основой этих методов является энергетический подход к управлению движением в пространстве. Этот подход расширен и обобщен на наземные фрагменты траектории полета. Важнейшим качеством и свойством прогноза является его правдоподобие. Для его повышения в статье предложены способы настройки прогнозирующих алгоритмов. Были выполнены модельные испытания прогнозирующих алгоритмов в широком диапазоне ситуаций на режимах взлета и посадки, включая отказ двигателя и наличие близко расположенных препятствий.

Результаты моделирования подтвердили возможность заблаговременного предупреждения или извещения пилота о возможности продолжения безопасного взлета или посадки. Такие извещения могут улучшить ситуативную осведомленность пилота и, таким образом, снизить вероятность ошибочных действий экипажа.

Вопросы, касающиеся формы и способов представления аудиовизуальных сообщений экипажу на борту, имеют важнейшее значение, входят в компетенцию специалистов по эргономике и летчиков-испытателей и поэтому оставлены за рамками данной работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boeing. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959 – 2011. July 2012. <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>.
2. Павлов Б.В., Шевченко А.М. Средства информационной поддержки пилота на этапах взлета и посадки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 206-214.
3. Ерусалимский М.А. Анализ принятия решения о прекращении или продолжении взлета в авиационных происшествиях и инцидентах // Aviation Explorer, 07.11.2011.
4. Глубокая М.Г. Бортовая система поддержки принятия решений на этапе взлёта пассажирского самолёта // Техника воздушного флота. Т. LXXXII. – 2008. – № 1 (690). – С. 21-30.
5. Middleton David B., Srivatsan R., Person Lee H. Jr. Flight Test of Takeoff Performance Monitoring System Indicates Successful Use in Research Vehicle // Flight Safety Digest. – 1994. – Vol. 13, № 10. – P. 1-25.
6. Никифоров С.П. Бортовая система контроля разбега – эффективное средство повышения безопасности взлётов транспортных самолётов // Техника воздушного флота. – 2002. – № 3–4. – С. 47-54.
7. Pinder S.D. Aircraft Takeoff Performance Monitoring in Far-Northern Regions: An Application of the Global Positioning System. // Ph.D. thesis. – University of Saskatchewan. – 2002.
8. Zammit-Mangion D., Eshelby M. An Operational Evaluation Of A Take-Off Performance Monitoring Algorithm. // ICAS2002 Congress. <http://lu.fme.vutbr.cz/icas2002/paper7105.pdf>.
9. Bove T., Andersen H.B.. The effect of an advisory system on pilots' go/no-go decision during take-off. // Reliability Engineering and System Safety. – 2002. – Vol. 75, № 2. – P. 179-191.

10. Шаров В.Д. Методика оценки вероятности выкатывания воздушных судов за пределы ВПП при посадке // Научный вестник МГТУ гражданской Авиации. – 2007. – № 122.
11. Завершинский В.В. Устройство для предотвращения выкатывания воздушных судов за пределы взлетно-посадочной полосы // Российская Федерация. Патент RU2373115, Опубликовано: 20.11.2009.
12. Constans F. Landing assistance device and method for aircraft // Франция. Патент FR 0605157. Дата публикации 21.12.2007
13. Борисов В.Г., Павлов Б.В., Шевченко А.М. Средства информационной поддержки пилота в нештатных ситуациях // Матер. 7-й науч.-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление». – СПб. ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. – С. 74-77.
14. Shevchenko A.M. Some Means for Informational Support of Airliner Pilot // 5th Int. Scientific Conf. on Physics and Control (Physcon 2011). Leon, Spain. Sept. 5-8, 2011. – P. 1-5 <http://lib.physcon.ru/doc?id=78f90e41e746/>.
15. Шевченко А.М., Павлов Б.В., Начинкина Г.Н. Метод прогнозирования взлета самолета при наличии высотных препятствий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 167-172.
16. Kurdjukov A.P., Nachinkina G.N., Shevchenko A.M. Energy Approach to Flight Control // AIAA Conf. Navigation, Guidance & Control. AIAA. – Boston, 1998. – P. 98-4211.
17. Борисов В.Г., Начинкина Г.Н., Шевченко А.М. Энергетический подход к управлению полетом // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 59-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Афанасьев.

**Шевченко Андрей Михайлович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: [anshev@ipu.ru](mailto:anshev@ipu.ru); 117997, ГСП-7, В-342, г. Москва, Профсоюзная, 65; тел.: 84953349039; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; к.т.н.; с.н.с.

**Павлов Борис Викторович** – e-mail: [pavlov@ipu.ru](mailto:pavlov@ipu.ru); тел.: 84953349351; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; д.т.н.; гл.н.с.

**Начинкина Галина Николаевна** – e-mail: [vicabo@ipu.ru](mailto:vicabo@ipu.ru); тел.: 84953349039; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; научный сотрудник.

**Shevchenko Andrei Mihailovich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: [anshev@ipu.ru](mailto:anshev@ipu.ru); 65, Profsoyuznaya street, Moscow, GSP-7, B-342, 117997, Russia; phone: +74953349039; laboratory of dynamic information\control systems; cand. of eng. sc.; senior scientist.

**Pavlov Boris Viktorovich** – e-mail: [pavlov@ipu.ru](mailto:pavlov@ipu.ru); phone: +74953349351; laboratory of dynamic information\control systems; dr. of eng. sc.

**Nachinkina Galina Nikolaevna** – e-mail: [vicabo@ipu.ru](mailto:vicabo@ipu.ru); phone: +74953349039; laboratory of dynamic information\control systems; scientist.

УДК 30, 34, 519.7 и 519.8

**Г.В. Горелова**

## **КОГНИТИВНЫЙ ПОДХОД К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

*Для социально-экономических, политических и других сложных систем «натурный» эксперимент над «живой» системой дорог, невозможен или недопустим (опасен). Необходим эксперимент над моделью системы. Эта задача решается методами имитационного моделирования. В статье представлена концепция имитационного моделирования сложных систем на основе сочетания методов системной динамики и когнитивного анализа. Рассматриваются базовые понятия, подходы, методы и модели, на которые опирается*