

## Определение показателей функциональной безопасности бесстыкового пути при действии температурных сжимающих сил

**Аннотация.** На сети ОАО «РЖД» эксплуатируются две основные конструкции пути — это звеньевой путь и бесстыковой путь температурно-напряженного типа. В соответствии с методологией УРРАН для путевого хозяйства наиболее значимыми показателями функциональной безопасности являются вероятность безопасной работы ( $P_0$ ) и вероятность опасного отказа ( $Q_0$ ), которые достаточно полно характеризуют состояние пути с точки зрения обеспечения безопасности движения, но необходимы алгоритмы определения этих показателей для опасных отказов пути.

В работе предложен алгоритм оценки уровня вероятности отказа по критерию появления температурного выброса бесстыкового пути. Выполнены проверочные расчеты действующих нормативов укладки бесстыковых плетей на предмет обеспечения ими требований функциональной безопасности по критерию появления температурного выброса пути. Подтверждено, что действующие нормы гарантируют требуемый уровень безопасности работы конструкции бесстыкового пути по критерию появления температурного выброса пути.

**Ключевые слова:** бесстыковой путь; выброс пути; вероятность выброса пути; вероятность отказа; вероятность безопасной работы

В настоящее время ОАО «РЖД» осуществляет переход от предупредительной системы технического обслуживания пути к системе, при которой планирование объемов работ и соответственно затрат на его техническое обслуживание выполняется на основе анализа его фактического состояния. Основной особенностью такого подхода является необходимость определения показателей, характеризующих конструкцию пути как системы, обеспечивающей безопасность перевозочного процесса. Такие показатели для инфраструктуры пути регламентированы СТО РЖД 02.041 – 2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Системы, устройства и оборудование путевого хозяйства. Требования надежности и функциональной безопасности», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 22 марта 2012 г. № 560р. Методология управления ресурсами, рисками на этапах жизненного цикла и анализ надежности (методология УРРАН) — это технология комплексного управления надежностью и рисками на железнодорожном транспорте, предназначенная для оптимизации управления ресурсами при его техническом обслуживании. Применение этой технологии

обеспечивает распределение ресурсов (денежных, материальных, трудовых), при котором достигается наилучший результат в обеспечении безопасности движения.

Для путевого хозяйства наиболее значимыми показателями функциональной безопасности являются [1]:

1. Вероятность безопасной работы  $P_0$ ;
2. Вероятность опасного отказа  $Q_0$ .

Данные показатели достаточно полно характеризуют состояние пути с точки зрения обеспечения безопасности движения, и для реализации подходов методологии УРРАН необходимы алгоритмы, позволяющие определять эти показатели для опасных отказов пути. На сети ОАО «РЖД» эксплуатируются две основные конструкции пути — это звеньевой путь и бесстыковой путь температурно-напряженного типа. Наиболее значимым отличием бесстыкового пути от звеньевого является наличие в бесстыковых плетях температурных сжимающих или растягивающих сил. При неудовлетворительном содержании пути эти силы могут спровоцировать опасные отказы пути, характерные только для этой конструкции, — выброс пути при действии сжимающих сил или сквозной излом плети при действии растягивающих. Наличие сигнальных рельсовых цепей дает возможность диагностировать наличие сквозного излома плети сразу при его появлении, что позволяет свести до практически приемлемых величин возможные потери от появления такого отказа; с выбросами пути ситуация абсолютно противоположная, поскольку возможность такого диагностирования отсутствует. Существуют системы, применение которых может значительно облегчить эту ситуацию, например RSM (Канада) или СКБП-2009 (Россия) [2]. Возможности этих систем позволяют организовать непрерывный мониторинг напряженного состояния плетей в режиме реального времени, а в случае нарушения устойчивости пути оповестить об этом. Однако по ряду причин, в том числе из-за высокой стоимости, широкого внедрения эти системы еще не получили, поэтому вопрос оценки вероятности отказа пути по критерию обеспечения его устойчивости от температурного выброса на сегодняшний день особенно актуален.

Согласно принципам нормирования устойчивости бесстыкового пути [3] процесс деформирования бесстыковых плетей в поперечном направлении при его нагреве характеризуется двумя состояниями:

- первое критическое состояние — достижение рельсошпальной решеткой (при воздействии на нее продольных сжимающих сил) поперечных перемещений, не приводящих к появлению остаточных сдвигов;
- второе критическое состояние — достижение рельсошпальной решеткой (при воздействии на нее продольных сжимающих сил) значительного уровня поперечных перемещений, т. е. непосредственно температурный выброс пути.

Продольные сжимающие силы, соответствующие критическим состояниям, связаны между собой следующими соотношениями:

$$\frac{N_k}{[N]} = k_y, \quad (1)$$

где  $N_k$  — критическая температурная продольная сжимающая сила, соответствующая 2-му критическому состоянию, кН;  $[N]$  — допускаемая температурная сжимающая сила, соответствующая 1-му критическому состоянию, кН;  $k_y$  — коэффициент запаса поперечной устойчивости бесстыкового пути, заложенный в нормативную базу.

В общем виде условие обеспечения устойчивости пути от температурного выброса может быть определено следующим выражением:

$$\tilde{N}_k - \tilde{N}_t \geq 0, \quad (2)$$

где  $\tilde{N}_t$  — фактическая температурная продольная сила как случайная величина, действующая в плети, кН;  $\tilde{N}_k$  — критическая температурная продольная сила как случайная величина, допускаемая для воздействия в данном сечении пути, кН.

Значение вероятности выполнения условия (2) есть значение  $P_o$  — вероятность безопасной работы бесстыкового пути по отказу условия его устойчивости, а обратная величина  $1 - P_o$  есть значение  $Q_o$  — вероятность появления отказа условия устойчивости бесстыкового пути.

Выражение (2) идентично условию обеспечения безопасности работы строительных конструкций, поэтому вероятность появления отказа условия устойчивости может быть определена следующим выражением [4]:

$$Q_o = \int_{-\infty}^{\infty} p_{N_k}(T) P_{N_t}(T) dT, \quad (3)$$

где  $p_{N_k}(T)$  — распределение плотности вероятности допускаемой критической продольной силы;  $P_{N_t}(T)$  — значение вероятности фактической температурной продольной силы;  $T$  — температура как переменная интегрирования, °С.

Для рельсов типа Р65 значения продольных сжимающих сил  $[N]$ ,  $N_k$ ,  $N_t$  определяются следующими выражениями [3, 4, 5]:

$$[N] = 20[\tilde{\Delta}t_y], \text{ кН}, \quad (4)$$

$$N_k = 20[\tilde{\Delta}t_y]k_y, \text{ кН}, \quad (5)$$

$$N_t = 20\tilde{\Delta}t, \quad (6)$$

где  $[\tilde{\Delta}t_y]$  — допускаемое повышение температуры рельсовой плети относительно температуры ее закрепления как случайная величина, распределенная по длине плети;  $\tilde{\Delta}t$  — фактическое повышение температуры рельсовой плети относительно температуры ее закрепления, как случайная величина, распределенная по длине плети, зависящая от температуры воздуха, уровня солнечной радиации, температуры закрепления плети.

С учетом соотношений (4)–(6) и сокращений постоянных коэффициентов выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$Q_o = \int_{-\infty}^{\infty} p_{[\Delta y], k_y}(T) P_{\tilde{\Delta}t}(T) dT. \quad (7)$$

Выполненные ранее исследования показали, что выброс происходит на участке пути длиной 7–15 м [4, 10], для таких длин с учетом продольной жесткости рельса и рельсовых скреплений можно принять скользящее среднее значение величины  $N_t$  на длине 7–15 м равным const, а значение  $P_{\tilde{\Delta}t}(T) = 1$ , поэтому выражение (3) можно записать в виде

$$Q_o = \int_{-\infty}^{\Delta t} p_{[\Delta y], k_y}(T) dT, \quad (8)$$

$$\Delta t = t_p - t_3, \quad (9)$$

где  $t_p$  — фактическая или ожидаемая температура рельсовой плети в рассматриваемом сечении;  $t_3$  — фактическая температура закрепления (нейтральная температура) в рассматриваемом сечении.

На рис. 1 представлен график функции  $Q_o$ .

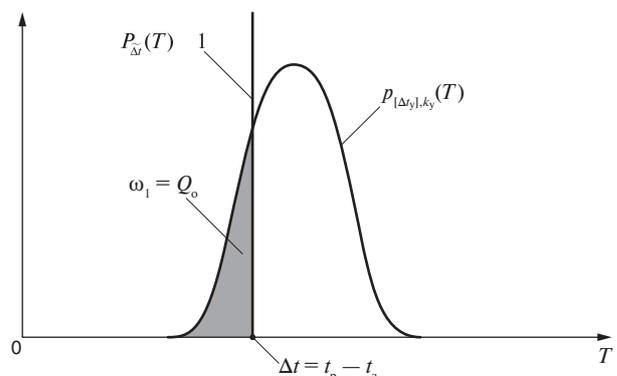


Рис. 1. График зависимости функций  $p_{[\Delta y], k_y}(T)$  и  $P_{\tilde{\Delta}t}(T) = 1$

Как видно из рис. 1, площадь  $\omega_1$ , образованная пересечением левосторонней полуплоскости функций  $P_{[\Delta t_y], k_y}(T)$  и  $P_{\Delta t}(T) = 1$ , численно равна значению  $Q_0$ .

Чем меньше площадь  $\omega_1$ , тем меньше вероятность появления отказа, а вероятность безопасной работы пути по отказу потери устойчивости выше. Справедливо и обратное, что при увеличении значения  $\omega_1$  вероятность появления отказа увеличивается, а вероятность безопасной работы пути уменьшается.

Из выражения (9) и рис. 1 очевидно, что для определения вероятности выброса в конкретном сечении пути нужно знать функцию распределения плотности вероятности допускаемого повышения температуры рельсовой плети относительно температуры ее закрепления, а также значение  $\Delta t$  или  $t_p$  и  $t_3$ . В качестве основного метода определения значений функции  $P_{[\Delta t_y], k_y}(T)$  является метод прямых экспериментов [5–7]. Суть метода состоит в том, что плети на экспериментальном участке пути нагреваются до определенной температуры  $\Delta t$ , а при нагреве фиксируются поперечные деформации шпал. В дальнейшем формируется выборка значений  $\Delta t$ , соответствующих поперечным перемещениям шпал 0,2 мм в прямых и 0,4 мм в кривых. Анализ результатов экспериментов показал, что параметры функции  $P_{[\Delta t_y], k_y}(T)$  подчиняются нормальному закону распределения. На рис. 2 приведена характерная гистограмма распределения экспериментальных значений  $\Delta t$  по массиву выборки, полученная в процессе нагрева плети.

Характер зависимости, изображенной на рис. 2, соответствует нормальному закону распределения, что позволяет в качестве параметров функции использовать значения, характеризующие нормальное распределение, — среднее значение случайной величины и дисперсию случайной величины (среднеквадратическое отклонение).

При нормальном законе распределения значения показателей функциональной безопасности бесстыкового пути по отказу потери устойчивости можно определить из следующих выражений [8]:

$$P_0 = \frac{1}{2} + \Phi \left( \frac{k_y [\Delta t_y] - \Delta t}{[\Delta t_y]} \right), \quad (10)$$

$$Q_0 = \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{k_y [\Delta t_y] - \Delta t}{[\Delta t_y]} \right), \quad (11)$$

где  $[\Delta t_y]$  — среднее значение допускаемого повышения температуры рельсовой плети относительно температуры ее закрепления (соответствует значениям  $[\Delta t_y]$ , указанным в нормативных документах [9, 10]);  $[\Delta t_y]$  — среднеквадратическое отклонение допускаемого повышения температуры рельсовой плети отно-

сительно температуры ее закрепления;  $\Phi$  — интеграл вероятности Гаусса  $\left\{ \Phi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\gamma \exp \frac{-x^2}{2} dx \right\}$ .

Значения  $[\Delta t_y]$  и  $k_y$ , согласно экспериментальным данным, составляют:

$[\Delta t_y] = 1 \div 2^\circ\text{C}$  — для стабилизированного пути, выправленного выправочными машинами циклического действия типа ВПР, Дуоматик;

$[\Delta t_y] = 2 \div 3^\circ\text{C}$  — для стабилизированного пути, выправленного выправочными машинами непрерывного действия типа ВПО-3000 и нестабилизированного пути, выправленного выправочными машинами циклического действия типа ВПР, Дуоматик;

$[\Delta t_y] = 4 \div 6^\circ\text{C}$  — для стабилизированного пути, выправленного электрошпалоподбойками;

$[\Delta t_y] = 7 \div 8^\circ\text{C}$  — для нестабилизированного пути, выправленного электрошпалоподбойками;

$[\Delta t_y] = 9 \div 11^\circ\text{C}$  — для нестабилизированного невыправленного пути;

$$k_y \geq 2.$$

Для проверки действующих норм устойчивости бесстыкового пути по показателям функциональной безопасности были определены значения  $Q_0$  в зависимости от плана линии, качества выправочных работ и величины нагрева плети. В качестве максимального значения величины нагрева было принято значение, определенное из следующего выражения:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max \max} - t_{3(\min)}, \quad (12)$$

где  $t_{\max \max}$  — максимальная температура рельса, наблюдаемая на сети дорог;  $t_{3(\min)}$  — минимальная температура закрепления рельса, допускаемая при эксплуатации бесстыкового пути, определяемая с учетом максимально разрешенного отклонения от норматива.

С учетом всех требований и допусков, указанных в нормативных документах [9, 10], значение  $\Delta t_{\max} = 60 - 10 = 50^\circ\text{C}$ . Для оценки полученных значений был применен критерий допускаемого уровня вероятности выброса, определенный в действующих нормативных документах [11], где максимально допускаемое значение вероятности выброса установлено на уровне 2,3%.

Расчеты показали, что при всех состояниях пути после выправки и во всем диапазоне значений плана линии до величины нагрева  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$  включительно вероятность отказа по выбросу пути не превышает допускаемых значений. При нагреве до максимального значения  $\Delta t_{\max} = 50^\circ\text{C}$  в прямых и кривых радиусом до 650 м включительно вероятность отказа также не превышает допуска. В кривых радиусом 350 м значение вероятности выброса больше нормы и равно 5,1% при невыправленном и нестабилизированном пути, а в

кривых радиусом 250 м значение вероятности выброса равно 4 и 10,2% при нестабилизированном пути, выправленном шпалоподбойками, и невыправленном нестабилизированном пути соответственно. Однако в соответствии с [9, 10] бесстыковые плети не укладываются взамен инвентарных рельсов до момента выправки пути машинизированными комплексами и стабилизации балластной призмы, поэтому состояния, при которых получены значения вероятностей, превышающие значение критерия, в эксплуатации не допускаются, что обеспечивает требуемый уровень безопасности работы конструкции.

**Выводы.** 1. Разработан алгоритм оценки уровня вероятности отказа по критерию появления температурного выброса бесстыкового пути.

2. Выполнены проверочные расчеты действующих нормативов укладки бесстыковых плетей на предмет обеспечения ими требований функциональной безопасности по критерию появления температурного выброса пути.

3. Результаты расчетов показали, что действующие нормы гарантируют требуемый уровень безопасности работы конструкции бесстыкового пути по критерию появления температурного выброса пути.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО РЖД 02.041–2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Системы, устройства и оборудование путевого хозяйства. Требования надежности и функциональной безопасности»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22 марта 2012 г. № 560р. С. 8–12.
2. Эксплуатационные испытания системы контроля напряжений в плетях бесстыкового пути (СКБП-2009) на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» / О.А. Суслов [и др.] // Повышение надежности работы железнодорожного пути: сб. трудов ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2013. С. 82–94.
3. Бромберг Е. М. Бесстыковой путь // Труды ВНИИЖТ, вып. 224. М.: Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение МПС, 1962. 215 с.
4. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

## Determining Functional Safety Indices of CWR Track Subject to Action of Thermal Compression Forces

**Oleg A. Suslov**, Candidate of Technical Science, Chief of Laboratory for CWR track, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 189 7763. E-mail: suslovoleg@mail.ru

**Abstract.** Two main railway track design versions may be observed on the JSC RZD network. They are jointed track and continuous welded rail track of temperature strained type. For the time being JSC RZD is well on the way from predictive track maintenance pattern to the pattern implying actual track condition analysis based planning of the quantities of maintenance work and respective expenditures. The key feature of such an approach lies in the necessity to determine indices characterizing track design version as a system ensuring safety of railway traffic operations.

In the present paper there is proposed failure probability assessment algorithm based on the thermal track buckling emer-

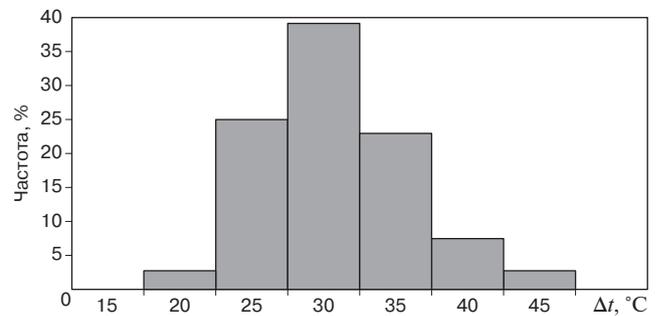


Рис. 2. Распределение экспериментальных значений  $\Delta t$  по массиву выборки (кривая, радиус 300 м, железобетонные шпалы, путь в нормальном состоянии)

5. Повышение эффективности бесстыкового пути: сб. науч. трудов / под ред. Е. М. Бромберга. М.: Транспорт, 1983. 120 с.
6. Совершенствование конструкции и эксплуатации бесстыкового пути: сб. науч. трудов / под ред. Е. М. Бромберга. М.: Транспорт, 1983. 120 с.
7. Определение норм устойчивости бесстыкового пути / О.А. Суслов [и др.] // Повышение надежности работы железнодорожного пути: сб. трудов ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2013. С. 35–51.
8. Вентцель А. Д. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1975. 320 с.
9. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. М.: Транспорт, 2000. 95 с.
10. Инструкция по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути: распоряжение ОАО «РЖД» №2788р от 29 декабря 2012 г. 138 с.
11. Методика контроля и оценки состояния бесстыкового пути на основе данных, получаемых по результатам проходов путеизмерительных средств, оборудованных подсистемами контроля устойчивости бесстыкового пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25.12.2014 г. № 3120р. С. 14–15.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**СУСЛОВ Олег Александрович**, заведующий лабораторией «Бесстыковой путь», ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10. Тел.: (499) 189-77-63. E-mail: suslovoleg@mail.ru

gence criterion. It has been confirmed that the existing standards ensure the required operational safety level of a track design version in the context of the indicated criterion.

**Keywords:** CWR track; track buckling; track buckling probability; failure probability; probability of safe operation

## References

1. "Russian Railways" Standard 02.041–2011 "Resource, risk, and reliability management in the stages of the life cycle. Systems, devices and equipment of track facilities. The requirements of reliability and functional safety". Approved by

the order of JSC "Russian Railways" of March 22, 2012 № 560r, pp. 8 – 12. (in Russ.).

2. Suslov O. A. et al. *Eksploatatsionnye ispytaniya sistemy kontrolya napryazheniy v pletyakh besstykovogo puti (SKBP-2009) na Eksperimental'nom kol'tse OAO "VNIIZhT"* [Performance tests of the system of tension control in continuous welded rails (SCWR-2009) on VNIIZhT experimental ring railroad]. *Povyshenie nadezhnosti raboty zheleznodorozhnogo puti*. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT" [Improving the reliability of the railway track operation. Coll. sci. works of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2013, pp. 82 – 94.

3. Bromberg E. M. *Besstykovoy put' [Welded railway track]*. Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Proceedings of the Railway Research Institute], 1962, no. 244. 215 p.

4. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruksiy na nadezhnost'* [Theory of calculation of building designs for reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 239 p.

5. Bromberg E. M., ed. *Povyshenie effektivnosti besstykovogo puti*. Sb. nauch. tr. [Improving the efficiency of welded rails. Coll. sci. works]. Moscow, Transport Publ., 1983. 120 p.

6. Bromberg E. M., ed. *Sovershenstvovanie konstruksii i ekspluatatsiya besstykovogo puti*. Sb. nauch. tr. [Improving the design

and operation of welded rails. Coll. sci. works]. Moscow, Transport Publ., 1983. 120 p.

7. Suslov O. A. et al. *Opreделение norm ustoychivosti besstykovogo puti* [Defining standards of stability of welded rails]. *Povyshenie nadezhnosti raboty zheleznodorozhnogo puti*. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT" [Improving the reliability of the railway track operation. Coll. sci. works of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2013, pp. 35 – 51.

8. Venttsel' A. D. *Kurs teorii sluchaynykh protsessov* [Course of the theory of stochastic processes]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 320 p.

9. *Tekhnicheskie ukazaniya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti* [Technical notes on the organization, installation, maintenance and repair of welded rails]. Moscow, Transport Publ., 2000. 95 p.

10. *Instructions for the organization, installation, and maintenance of welded rails*. Order of OAO "RZD" №2788 r of December 29, 2012. 138 p. (in Russ.)

11. *Methods of monitoring and evaluation of welded rails on the basis of data obtained as a result of passage-way measuring devices equipped with stability control subsystems of welded rails*. Approved by the order of JSC "Russian Railways" of December 12, 2014, № 3120r, pp. 14 – 15. (in Russ.).

## «Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на **научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ»)** можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ.

**Подписной индекс журнала — 70116.**

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru.

**Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья** могут подписаться на журнал «Вестник ВНИИЖТ» по каталогам подписного агентства «МК-Периодика» ([www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru)).

**«VNIIZhT Bulletin» («Railway Research Institute Bulletin»)** — научно-технический журнал на английском языке, издается ОАО «ВНИИЖТ» с 2011 г. (ISSN 2220 – 9484). Периодичность — 2 раза в год. В журнале публикуются наиболее значимые и актуальные для зарубежных читателей научные статьи, опубликованные в журнале «Вестник ВНИИЖТ» на русском языке.

**Оформить подписку** можно в подписном агентстве «МК-Периодика» ([www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru)) или в редакции журнала по электронной почте [journal@vniizht.ru](mailto:journal@vniizht.ru).