

Zamkova Lubov Ivanovna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: pi@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)371-743.

Department of Applied Information Science; assistant.

УДК. 539.4

В.А. Жорник, П.А. Савочка

**ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ
НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ***

В работе проводится исследование развития поверхностных кольцевых трещин в нагретом цилиндре из неорганического стекла при его охлаждении в воде. Показано, что трещина под действием нестационарных температурных напряжений растет сначала скачком, а далее относительно медленно с остановкой не доходя до оси (цилиндр лопается). Выяснено, что вода, помимо охлаждающего действия, выступает как поверхностно активная среда, уменьшая прочность стекла. Проведено сравнение расчетных значений термостойкости стеклянных цилиндров с экспериментальными данными, показавшее их хорошее совпадение.

Цилиндр; неорганическое стекло; кольцевая трещина; охлаждение; вода; температурные напряжения; экспериментальные данные.

V.A. Zhornik, P.A. Savochka

**FRAGILE FRACTURE OF CYLINDRICAL SOLIDS UNDER
NON-STATIONARY HEAT IMPACT**

Surface cracks' propagation research in a heated cylinder made of inorganic glass under cooling in water is carried out. It is shown that under non-stationary temperature stresses a crack grows jump-like firstly and relatively slow after that not reaching the axis (the cylinder bursts). It was find out that the water besides cooling reveals itself as a surface active medium reducing glass strength. Comparison of glass heat resistance computational values with experimental data shown their good agreement was carried out.

Cylinder; inorganic glass; surface cracks; under cooling; water; temperature; experimental data.

Хрупкое разрушение характеризуется термостойкостью. Под термостойкостью хрупких материалов, в частности неорганических стекол, понимается способность этих материалов выдерживать температурные перепады [1]. Термостойкость зависит от интенсивности теплового воздействия, физико-механических постоянных, размеров и формы изделия и т.д. Теоретическим и экспериментальным исследованием термостойкости неорганических стекол посвящен ряд работ [1-3]. В ча-

* Работа выполнена в Научно-образовательном эколого-аналитическом Центре Юга России ЮФУ при финансовой поддержке Фонда CRDF и Министерства Образования РФ по Российско-американской программе «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) и программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Рособразования РФ (проекты Р.Н.П. 2.2.2.2.3915, ВР3С04, ВР4М04, Р.Н.П. 2.2.2.2.3.10012, У-4-М-04-08).

стности, в [2] испытания на термостойкость стеклянных сплошных цилиндров радиуса r_c проводились ступенчатым методом. Образцы стекла нагревались до определенной температуры T_0 , выдерживались при этой температуре (для равномерного прогрева образцов по толщине) и резко охлаждались в воде температуры θ с коэффициентом теплообмена α_0 .

Максимальная разность температур $T_0 - \theta$, при которой образец еще не разрушался, принималась за меру термостойкости стеклянного образца. Образец испытывался путем многократного ступенчатого повышения температуры печи (через 10К) до тех пор, пока не разрушался. Таким образом, образцы с самыми крупными трещинами испытывались однократно, а с самыми мелкими многократно (до 10 раз).

Разброс значений термостойкости образцов зависит в основном от разброса прочности, которая в свою очередь зависит от размеров трещиноподобных дефектов на поверхности образцов.

За меру термостойкости бралось среднее значение термостойкости из 100 и более образцов, а также строилась функция распределения термостойкости

$$\rho = \frac{1}{N} \frac{\Delta N}{\Delta T}, \quad (1)$$

где N – число испытанных образцов; ΔN – число образцов, термостойкость которых лежит в интервале от T до $T + \Delta T$; ΔT – выбранный температурный интервал.

При быстром охлаждении наиболее резкие перепады температур, нарастающие во времени t , происходят у поверхности цилиндра, где осевые и окружные напряжения одинаковы, а радиальные равны нулю. Анализировались трещины близкие к кольцевым, рост которых вызывается осевыми напряжениями $\sigma_{zz}(r, t)$. С течением времени происходит выравнивание градиентов температур. В соответствии с этим, осевые термоупругие напряжения на поверхности стекла достигают максимальной величины, а затем уменьшаются. Если максимальная величина напряжений превышает предел прочности на растяжение, то стекло разрушается.

Исходя из этих соображений, в [1] получена формула для расчета термостойкости:

$$(T_0 - \theta) = \frac{\sigma(1 - \nu)}{\alpha_T E \sigma_{zz}^*(1, Fo)}, \quad (2)$$

где σ – прочность стекла на растяжение; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; α_T – коэффициент термического расширения стекла; $Fo = \frac{at}{r_c^2}$ – критерий Фурье;

$a = \frac{\lambda_T}{\rho c}$ – температуропроводность; λ_T – теплопроводность; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость стекла; $\sigma_{zz}^*(1, Fo)$ – максимальное значение во времени Fo безразмерного осевого напряжения

$\frac{\sigma_{zz}(r_c, t)(1 - \nu)}{\alpha_T E (T_0 - \theta)}$ на поверхности цилиндра, зависящего от интенсивности охлаждения цилиндра критерия Био –

$Bi = \frac{\alpha_0 r_c}{\lambda_T}$. На рис. 1 приведено распределение по сечению цилиндра $\rho = r/r_c$ осевого

напряжения $\sigma_{zz}^*(\rho, Fo)$ в зависимости от времени Fo при интенсивности теплообмена $Bi = 90$ (сплошные линии).

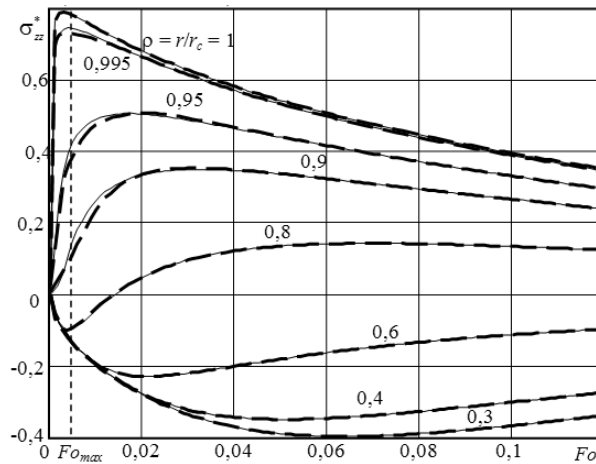


Рис. 1. Зависимость $\sigma_{zz}^*(\rho, Fo)$ от времени Fo в различных точках цилиндра ρ

Прочность на растяжение стеклянных цилиндров радиуса $r_c = 2 \cdot 10^{-3}$ м с физико-механическими постоянными $E = 6 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,23$, $\alpha_T = 87 \cdot 10^{-7}$ 1/К, $\lambda_T = 0,5852$ Вт/м·К, $\rho = 3,03 \cdot 10^3$ кг/м³, $c = 8,33 \cdot 10^2$ Дж/кг·К измерялась методом чистого изгиба. Поэтому напряжения распределялись линейно по радиусу с максимумом на поверхности.

Измерения проводились на воздухе с предварительным подогревом до температуры $40^\circ\text{C} = 313\text{K}$ (для удаления влаги) и в воде при $20^\circ\text{C} = 293\text{K}$ с выдержкой ~ 5 с. Функции распределения прочности приведены на рис. 2.

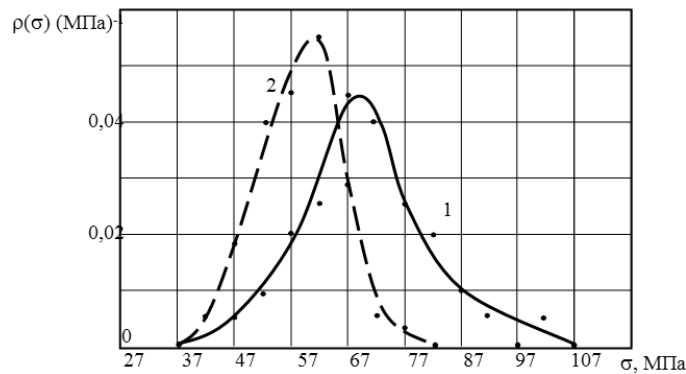


Рис. 2. Распределение прочности образцов стеклянных цилиндров радиуса $r_c = 2 \cdot 10^{-3}$ м, измеренных: 1 – на воздухе, 2 – в воде

Из графиков (см. рис. 2), видно, что для цилиндров прочностью $\sigma \sim 37$ МПа с большими трещинами (как будет показано ниже глубиной $0,1 \text{ мм} = 10^{-4}$ м) влага не успевает проникать в кончик трещины и поэтому вода не влияет на прочность. Однако для цилиндров с большой прочностью $\sigma \sim 107$ МПа (с малыми трещинами глубины $\sim 0,01 \text{ мм} = 10^{-5}$ м) вода проникает в кончик трещины и значительно влияет на прочность, снижая её на $\sim 23\%$. Нужно отметить, что в [4] это снижение в пределах 20%-30%.

На рис. 3 крестиками показана функция распределения экспериментальных значений термостойкости стеклянных цилиндров и ее среднее значение, полученных выше описанным ступенчатым методом в [2]. Функция распределения теоретических значений термостойкости, полученная по (2) с учетом функции распределения прочности измеренной на воздухе – кривая 1 (см. рис. 1), приведена на рис. 3 (кривая 1).

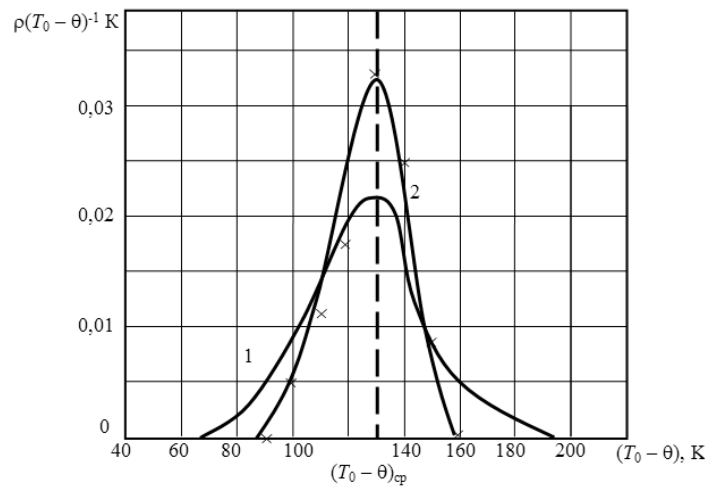


Рис. 3. Распределение термостойкости образцов стеклянных цилиндров радиуса $2 \cdot 10^{-3}$ м, \times – эксперимент, 1 – расчет по (2), 2 – теоретическая кривая

Как видно из графиков, экспериментальные и теоретические средние значения термостойкости совпадают и равны ~ 130 К. Такое совпадение выполнялось для трех марок стекол с различными физико-механическими постоянными и радиусами цилиндров. Это позволило уточнить коэффициент теплообмена α_0 для данной установки между нагретым образцом и охлаждающей средой, который предварительно определялся по экспериментальным и теоретическим средним значениям термостойкости стеклянных трубок. Этот коэффициент оказался равным $0,59 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град} = 24,7 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. С учетом того, что теплопроводность материала стекла $\lambda_T = 0,5852 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, критерий Био $Bi = 90$. Однако разброс теоретических значений ($66 \text{ К} < (T_0 - \theta) < 190 \text{ К}$) термостойкости намного превосходит разброс экспериментальных значений ($90 \text{ К} < (T_0 - \theta) < 160 \text{ К}$). Причем это выполнялось для всех случаев, исследованных в [1-3].

Для объяснения этих различий необходимо обратить внимание на то, что в формуле (2) для расчета термостойкости предполагалось, что температурные напряжения, возникающие на берегах кольцевой трещины, равномерно распределены вдоль берегов, равны напряжениям на поверхности цилиндра и вызывают мгновенное разрушение. Однако это далеко не так и справедливо лишь для мельчайших трещин (см. рис. 1). Поэтому необходимо рассчитать кинетику развития кольцевой трещины в цилиндрах под действием вышеуказанных неравномерных нестационарных нагрузок.

В работе авторов [5] исследовалась кинетика роста кольцевых трещин в цилиндре под действием температурных напряжений, возникающих при его охлаждении. Решение задачи свелось к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I , управляю-

шего ростом трещины. При решении интегрального уравнения температурные напряжения $\sigma_{zz}^*(\rho, Fo)$ интерполировались полиномами. Интерполированные напряжения (см. рис. 1) изображены пунктирными линиями.

В частности, КИН при линейном распределении нагрузки по радиусу имеет вид:

$$K_{I,1} = \sqrt{\pi r_c} \sigma \sqrt{1-\alpha} [K_1^{(0)} - (1-\alpha)K_1^{(1)}], \quad (3)$$

где $K_1^{(0)} = 1,1213$, $K_1^{(1)} = 0,6828$, σ – напряжение на поверхности цилиндра, r_d – радиус фронта трещины.

Найдем начальные размеры кольцевых трещин и кинетику их роста с учетом критерия Ирвина: когда КИН достигает критического значения K_{IC} – трещиностойкости, постоянной материала – трещина начинает расти.

K_{IC} для неорганического стекла с удалением влаги равен $0,71 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, что позволило по (3) найти начальные размеры трещин при заданной σ . Для $\sigma = 37 \text{ МПа}$ глубина трещины $\ell_1 = 10^{-4} \text{ м}$ ($\alpha = 0,95$), а для $\sigma = 107 \text{ МПа}$ $\ell_2 = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ($\alpha = 0,994$). В [6] глубина трещин в неорганическом стекле $10^{-4} < \ell < 10^{-5} \text{ м}$.

На рис. 4 приведены графики зависимости безразмерного КИН K_I^* от безразмерного времени Fo для различных размеров кольцеобразных трещин α , где

$$K_I^* = \frac{2K_{IC}(1-\nu)}{\sqrt{\pi r_c} \alpha_T E(T_0 - \theta)}. \quad (4)$$

Проанализируем развитие трещин в цилиндре и термостойкость. Согласно кривой $\alpha = 0,95$ (самая крупная кольцевая трещина) K_I^* начинает увеличиваться со временем и в момент времени $Fo=0,015$ достигает максимума $(K_I^*)_{\max} = K_{IC}^* = 0,31$ (верхняя горизонтальная пунктирная линия). В этот момент времени трещина начинает расти скачком до $\alpha = 0,85$ и далее растет относительно медленно (устойчиво) до $\alpha = 0,75$ и в момент времени $Fo = 0,04$ останавливается. Для всех последующих размеров α K_I^* меньше $0,31$. Трещина размера $\alpha = 0,75$ ($\ell = 0,5 \text{ мм}$) мала и плохо просматривается. Согласно (4) найдем теоретическую термостойкость цилиндра с самой крупной трещиной с учетом, что $(K_I^*)_{\max} = K_{IC}^* = 0,31$,

$$(T_0 - \theta)_{\min} = \frac{2K_{IC}(1-\nu)}{\sqrt{\pi r_c} \alpha_T E(K_I^*)_{\max}} = 86 \text{ К}. \quad (5)$$

Экспериментальное значение, как видно из (см. рис. 3), равно 90 К . Увеличение минимальной термостойкости с 66 К до 86 К связано с тем, что на берегах трещины нагрузка неравномерная и уменьшается по мере приближения к концу трещины. В формуле (5) $K_{IC} = 0,71 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, т.к. влага в кончик крупной трещины ($\ell \sim 0,1 \text{ мм}$) при однократном испытании не успевает проникать.

Найдем теоретическую термостойкость цилиндра с самой мелкой трещиной $\alpha = 0,994$, используя рис. 4.

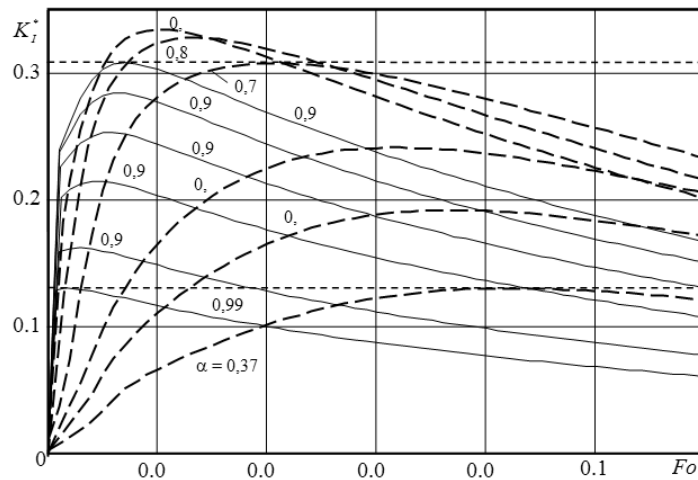


Рис. 4. Зависимость КИН K_I^* от времени Fo для разных размеров трещины α

Эта кривая достигает максимума $K_{IC}^* = 0,13$ при $Fo = 0,005$ и растет скачком до $\alpha = 0,85$ и далее относительно медленно растет до значения $\alpha = 0,37$. В момент времени $Fo = 0,09$ ($t \sim 1,5$ с) трещина останавливается (нижняя горизонтальная штриховая линия). Трещина $\alpha = 0,37$ ($\ell = 1,26$ мм) глубокая и хорошо просматривается. Скорость движения кончика трещины на медленной стадии $v \sim 0,8$ мм/сек = $0,8 \cdot 10^{-3}$ м/с. Максимальная теоретическая термостойкость, рассчитанная по (4), при $(K_I^*)_{\max} = 0,13$ и $K_{IC} = 0,71$ МПа·м^{1/2} для стекла при отсутствии в кончике трещины влаги равна:

$$(T_0 - \theta)_{\max} = \frac{2K_{IC}(1-\nu)}{\sqrt{\pi r_c \alpha_t E (K_I^*)_{\max}}} = 204 \text{ К.} \quad (6)$$

Повышенное теоретическое значение термостойкости 204К по сравнению с рассчитанным по (2) 190К даже для относительно мелких трещин ($\alpha = 0,994$) связано с неравномерным распределением нагрузки на берегах трещины. Экспериментальная максимальная термостойкость, как уже говорилось (см. рис. 3), равна 160К.

Однако, согласно рисунку (см. рис. 2), в относительно медленно развивающиеся трещины ($v \sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м/с) малых начальных размеров ($\ell \sim 0,01$ мм) при многократном (до 10 раз) охлаждении цилиндров проникает влага. В [7] показано, что скорость поверхностной диффузии влаги по поверхности стекла равна $(5-10) \cdot 10^{-3}$ м/с. Таким образом, в этом случае при охлаждении стеклянных цилиндров в воде влага при медленном росте трещины присутствует в кончике трещины и тем самым снижает прочность σ на 23%. В [5] показано, что для мелких трещин справедливо равенство:

$$K_{IC} = \sqrt{\pi \ell} \sigma K_1^{(0)}. \quad (7)$$

Поэтому и трещиностойкость K_{IC} понижается на 23%. С учетом этого трещиностойкость стекла в воде $K_{IC} = 0,55$ МПа·м^{1/2}.

В [4] трещиностойкость стекла при обычных условиях равна 0,53 МПа·м^{1/2}. По-видимому, в него проникала влага из воздуха. С учетом уменьшения трещиностойкости до 0,55 МПа·м^{1/2}

$$(T_0 - \theta)_{\max} = \frac{2K'_{ic}(1-\nu)}{\sqrt{\pi r_c \alpha_T E(K_I^*)_{\max}}} = 158 \text{ К}, \quad (8)$$

в то время, как экспериментальное значение максимальной трещиностойкости равно 160 К.

Построим функцию распределения теоретической термостойкости в предположении, что трещиностойкость в первом приближении по мере углубления трещины линейно увеличивается от 0,55 МПа·м^{1/2} до 0,71 МПа·м^{1/2}. На рисунке (см. рис. 3) изображена уточненная функция распределения теоретической термостойкости – кривая 2. Из рисунка (см. рис. 3) видно хорошее совпадение этой теоретической и экспериментальной функций распределения термостойкости стеклянных цилиндров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бартенев Г.М.* Механические свойства и тепловая обработка стекла – М.: Госуд. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. – 166 с.
2. *Жорник А.И.* Поля температур и напряжений, возникающие в твердых телах цилиндрической формы при тепловых нестационарных воздействиях // Диссертация канд. физ-мат. наук. – М.: МГПИ, 1972. – 201 с.
3. *Tabata K., Moriya T.* On the thermal endurance of glass // J. Amer. Ceram. Soc. 1934. V. 17, №2, P. 31-39.
4. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
5. *Zhornik V.A., Prokopenko Yu.A., Rybinskaya A.A., Savochka P.A.* Ring-shaped crack propagation in a cylinder under nonsteady cooling // High Performance Structures and Materials III. – WIT Press Southampton U.K., Boston USA, 2006, P. 521–526.
6. *Андерсон О.Л.* Критерий Гриффитса при разрушении стекла // Атомный механизм разрушения. Материалы Международной конференции по вопросам разрушения. Свонпскотт (США), 1959. – С. 331-353.
7. *Бартенев Г.М.* Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с.

Жорник Виктория Александровна

Таганрогский государственный педагогический институт.

E-mail: Zhornik_Victoria@mail.ru.

347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48.

Тел.: 8(8634)601-807.

Кафедры общей и теоретической физики; доцент.

Савочка Петр Анатольевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: savochka07@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)371-603.

Кафедра конструирования электронных средств; ассистент.

Zhornik Viktoriya Aleksandrovna

Taganrog State Pedagogical Institute.

E-mail: Zhornik_Victoria@mail.ru.

48, Initsiativnaya, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)601-807.

Department of General and Theoretical Physics; associate professor.

Savochka Petr Anatolievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: savochka07@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)371-603.

Department of Electronic Apparatuses Design; assistant.

УДК004.67: 006.88

М.В. Телегина, А.А. Коробейников, Р.И. Янников

**ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

В работе рассмотрен вопрос о выборе величин нормирования параметров экологического мониторинга объекта уничтожения химического оружия. Приведена классификация величин нормирования для данных экологического мониторинга. Показаны примеры визуализации данных с использованием нормирования в виде графика и экологической карты. Для оценки степени опасности воздействия отравляющих веществ на здоровье людей при аварийных ситуациях предусмотрены различные режимы визуализации с применением нормирования.

Аварийные ситуации; визуализация; нормирование; обеспечение безопасности; принятие решений; экологический мониторинг.

M.V. Telegina, R.I. Yannikov

**FEATURES OF NORMALIZATION OF PARAMETERS OF
ENVIRONMENTAL POLLUTION**

In work the question on a choice of sizes of normalization of parameters of ecological monitoring of object of destruction of the chemical weapon is considered. Classification of sizes of normalization for data of ecological monitoring is resulted. Examples of visualization of data with use of normalization in the form of the schedule and an ecological card are shown. For an estimation of a degree of danger of influence of poison gases on health of people at emergencies various modes of visualization with application of normalization are stipulated.

Emergencies; visualization; normalization; a safety; decision-making; ecological monitoring.

Введение. В настоящее время существует множество источников загрязнения окружающей среды. Так, к концу 1980-х гг. накопилось множество научных фактов, свидетельствующих об ускоренном процессе глобального изменения климата и подтверждающих наличие связи между антропогенными выбросами парниковых газов (ПГ) и глобальным изменением климата. Это привело к росту обеспокоенности в научном сообществе и в правительственных кругах многих стран и к осознанию необходимости заключения глобального соглашения по проблеме изменения климата. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) была открыта для подписания на всемирной встрече на высшем уровне по проблемам экологии и устойчивого развития в Рио-де-Жанейро в июне 1992 г. Конечная цель Конвенции заключается в стабилизации концентраций ПГ в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему [1].