

УДК 624.953:624.046.03

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ К РАСЧЕТУ КОНСТРУКЦИЙ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

ЕГОРОВ Е. А.^{1*}, д.т.н., проф.
КОВТУН-ГОРБАЧЕВА Т. А.^{2*}, к.т.н., доц.

^{1*} Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : evg_egorov@list.ru, ORCID ID : 0000-0003-2993-0570.

^{2*} Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : dp000233@yandex.ru.

^{3*} ООО «АКИМ».

Аннотация. *Целью статьи* является иллюстрация некоторых специфических особенностей применения метода предельных состояний для расчета конструкций в аварийных ситуациях. *Актуальность исследования.* В нормах проектирования нагрузки и воздействия, возникающие в аварийных ситуациях, рассматриваются как эпизодические, учет которых осуществляется в соответствующих аварийных сочетаниях. Сами методы расчета при этом остаются такими же, как и в обычных проектных ситуациях. Для целого ряда уникальных зданий и сооружений такой подход к расчету приводит к необоснованному завышению металлоемкости несущих конструкций. В статье рассмотрены примеры расчета несущих стальных конструкций в аварийных ситуациях по полному исчерпанию несущей способности, что позволяет существенно снизить металлоемкость и стоимость. *Методы исследования:* реализация предложенных в статье алгоритмов осуществлена применительно к стальным балкам. С использованием инженерных методов определяются количественные оценки предельных нагрузок для балок, соответствующие тем или иным нормативным требованиям (нормативным предельным состояниям). *Результаты:* получены количественные оценки предельных нагрузок, показывающие, что расчет несущих конструкций в аварийных ситуациях по полному исчерпанию их несущей способности позволяет в отдельных случаях существенно повысить предельно допустимую нагрузку. *Практическая значимость:* общие принципы приведенных в статье алгоритмов могут быть распространены на целый ряд других несущих конструкций, которые должны проектироваться с учетом возможной реализации той или иной аварийной ситуации, придерживаясь таких алгоритмов, можно существенно снизить материалоемкость и стоимость зданий и сооружений.

Ключевые слова: предельные состояния, несущая способность, аварийные ситуации, предельные нагрузки, несущие конструкции, полное исчерпание несущей способности,

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ДО РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ В АВРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

ЕГОРОВ Е. А.^{1*}, д.т.н., проф.
КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т. А.^{2*}, к.т.н., доц.

^{1*} Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : evg_egorov@list.ru, ORCID ID : 0000-0003-2993-0570.

^{2*} Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : dp000233@yandex.ru.

^{3*} ООО «АКИМ».

Анотация. *Метою статті* є ілюстрація деяких специфічних особливостей застосування методу граничних станів для розрахунку конструкцій в аварійних ситуаціях. *Актуальність дослідження.* У нормах проектування навантаження і впливи, що виникають в аварійних ситуаціях, розглядаються як епізодичні, облік яких здійснюється у відповідних аварійних сполученнях. Самі методи розрахунку при цьому залишаються такими ж, як і в звичайних проектних ситуаціях. Для цілого ряду унікальних будівель і споруд такий підхід до розрахунку призводить до необґрунтованого завищення металоемності несучих конструкцій. У статті розглянуті приклади розрахунку несучих сталевих конструкцій в аварійних ситуаціях за повного вичерпання несучої здатності, що дозволяє істотно знизити металоемність і вартість. *Методи дослідження:* реалізація запропонованих в статті алгоритмів здійснена стосовно сталевих балках. З використанням інженерних методів

визначаються кількісні оцінки граничних навантажень для балок, відповідні тим чи іншим нормативним вимогам (нормативним граничними станами). **Результати:** отримані кількісні оцінки граничних навантажень, які показують, що розрахунок несучих конструкцій в аварійних ситуаціях за повного вичерпання їх несучої здатності дозволяє в окремих випадках суттєво підвищити гранично допустиме навантаження. **Практична значимість:** загальні принципи наведених у статті алгоритмів можуть бути поширені на цілий ряд інших несучих конструкцій, які повинні проектуватися з урахуванням можливої реалізації тієї чи іншої аварійної ситуації, дотримуючись таких алгоритмів, можна істотно знизити матеріаломісткість і вартість будівель і споруд.

Ключові слова: граничні стани, несуча здатність, аварійні ситуації, граничні навантаження, несучі конструкції, повне вичерпання несучої здатності

FEATURES OF THE METHOD OF CALCULATION OF LIMIT STATES DESIGN IN EMERGENCY SITUATIONS

Egorov E. A.^{1*}, prof.

Kovtun- Horbachova T. A.^{2*}, PhD.

1 * Department metaleviih, derev'yaniih that Plastic konstruktсий, Reigning vischy The Teaching mortgage "Pridniprovska Derzhavna akademiya budivniststva that arhitekturi" vul. Chernishevskogo, 24-a, 49600, Dnipropetrovs'k, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-05, e-mail: evg_egorov@list.ru, ORCID ID: 0000-0003-2993-0570.

2 * Department metaleviih, derev'yaniih that Plastic konstruktсий, Reigning vischy The Teaching mortgage "Pridniprovska Derzhavna akademiya budivniststva that arhitekturi" vul. Chernishevskogo, 24-a, 49600, Dnipropetrovs'k, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-05, e-mail: dp000233@yandex.ru.

Annotation. *The aim* of the article is to illustrate some of the specific features of the method for calculating the limit states of structures in emergency situations. The relevance of research. The standards of design loads and forces encountered in emergency situations shall be considered as incidental, which are accounted in their respective emergency combinations. Themselves with the calculation methods are the same as in conventional design situations. For a number of unique buildings and structures the approach to the calculation results in an unjustified overestimation of metal bearing structures. In the article the examples of calculation of load-bearing steel structures in emergency situations, the full depletion of load-bearing capacity, which significantly reduces metal consumption, and cost. **Methods:** implementation of the proposed article algorithms implemented in relation to steel beams. With the use of engineering methods are determined by quantitative evaluation of the limit loads for beams, corresponding to various regulatory requirements (regulatory limit states). **Results:** Quantitative evaluation of maximum loads, indicating that the calculation of load-bearing structures in emergency situations, the full exhaustion of their bearing capacity allows, in some cases significantly increase the maximum allowable load. **Practical value:** the general principles contained in Article algorithm can be extended to a number of other supporting structures, which should be designed taking into account the possible implementation of a particular emergency, adhering to such algorithms, it is possible to significantly reduce the consumption of materials and the cost of buildings and structures.

Keywords: limit states, load-bearing capacity, emergency situations, limiting the load bearing structure, complete exhaustion of bearing capacity,

Введение

Философия метода предельных состояний (ПС) строительных объектов такова, что сам по себе метод обречен на практически бесконечное развитие и совершенствование.

С одной стороны, принятые сейчас в нормативных документах аналитические модели, описывающие надежность строительных объектов (а это, прежде всего, учет процессов деградации на протяжении всего жизненного цикла), в действительности зависят от огромного количества факторов, имеющих сложнейшую физическую природу, и их влияние на показатели надежности требует дальнейшего изучения. В этой связи, достаточно отметить тот факт, что в настоящем виде основные зависимости метода ПС очень слабо реагируют на целый ряд аспектов, связанных с эксплуатационными факторами и, в частности, с физическим износом, конструкций в процессе

эксплуатации, многие предложения, имеющиеся в технической литературе [1-5] по этим вопросам, не находят своего отражения в нормах проектирования. Весьма сомнительными остаются положения действующих норм [6] по определению расчетных значений снеговой и ветровой нагрузок в зависимости от задаваемой долговечности зданий и сооружений. Дальнейшего изучения требует и учет динамической составляющей той же ветровой нагрузки и т.д.

С другой стороны, развитие цивилизации ставит на повестку дня необходимость создания таких уникальных по многим признакам объектов (высотные здания, здания строительного комплекса атомных электростанций, большепролетные мосты и др.), надежность эксплуатации которых должна учитывать не только обычные виды процессов «старения» конструкций в процессе эксплуатации, но и возможность влияния на надежность совершенно новых факторов. Изменяется отношение к ряду

ситуаций. Так, согласно [6], нагрузки и воздействия, возникающие при землетрясениях, пожарах, технологических авариях, неравномерных деформациях основания и др., для обычных конструкций можно считать эпизодическими (землетрясение, пожар, технологические аварии, терроризм и т.д.), то для уникальных объектов некоторые из них нужно рассматривать как вполне возможные, поскольку увеличение масштабности рассматриваемых объектов приводит, во-первых, к возрастанию вероятности возникновения таких нагрузок, во-вторых, резко возрастает ущерб (в том числе и людские потери) от возникновения подобных ситуаций. Проектирование конструкций с учетом таких аварийных ситуаций, применяя обычные требования метода ПС, регламентированные соответствующими нормативными документами (применительно к строительным металлоконструкциям [7]), приводит к резкому удорожанию строительства. Поэтому в таких случаях, как правило, к предельным состояниям основных несущих конструкций можно сформулировать несколько иные требования, отвечающие тем или иным заданным условиям функционирования этих конструкций и объекта в целом в таких аварийных ситуациях. Т.е., расчет конструкций в аварийных ситуациях должен отличаться не только особенностями учета нагрузок и воздействий в расчетных сочетаниях, но и физическими моделями предельных состояний.

Все выше сказанное иллюстрируется в данной статье на примере применения метода ПС для расчета конструктивных элементов в аварийных ситуациях, связанных с возможностью существенного возрастания нагрузки. Применительно к строительным металлоконструкциям в действующих нормах проектирования [7] любой конструктивный элемент должен удовлетворять требованиям по условиям прочности, общей и местной устойчивости, а также определенным ограничениям по деформативности. Вместе с тем, в аварийных ситуациях в целом ряде рекомендаций, например, для высотных зданий [8-10], основные требования, как правило, сводятся только к выполнению первой группы ПС, причем фактически без ограничения деформаций. Иными словами, в аварийных ситуациях несущие конструкции (очевидно, это будет иметь место и для большинства других уникальных зданий и сооружений) можно рассчитывать по состояниям, действительно определяющим полное исчерпание их несущей способности. Т.е., можно сказать, по физическим ПС, в отличие от обычных, нормативных ПС, определяющих непригодность конструкции к нормальной эксплуатации (вторая группа ПС), или непригодность к эксплуатации вообще (первая группа ПС). Это позволяет более полно использовать прочностные свойства материала и существенно снизить расход материала (бетон с арматурой в железобетонных конструкциях и металл в

конструкциях с металлическим каркасом) при проектировании объектов, которые должны сохранять свою целостность при возникновении аварийных ситуаций.

Результаты

В данной статье для примера рассматривается стальная балка, которая может служить ригелем в металлическом каркасе какого-либо здания или сооружения. В первом приближении оценка предельных значений нагрузок таких балок с учетом тех или иных ограничений может быть произведена инженерным методом с использованием известных зависимостей, в том числе и расчетных формул [7].

Рассматривается шарнирно опертая однопролетная балка пролетом 21,6 м, сечением согласно рис. 1.

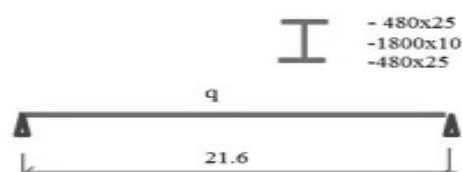


Рис. 1. Однопролетная балка / single beam

По всей своей длине балка загружалась равномерно распределенной погонной нагрузкой q . Рассматривались варианты балок с различной толщиной стенки. Толщина стенки менялась от 10 до 18 мм с градацией в 2,0 мм. Это соответствует приведенным гибкостям $\bar{\lambda}$

$= h_w / t_w \sqrt{R_y / E}$ от 6,1 до 3,4. Местная

устойчивость стенки обеспечивалась установкой поперечных ребер жесткости, которые располагались с шагом 3,6 метров. Для исключения потери общей устойчивости балки из своей плоскости (по изгибно-крутильной форме) верхний пояс балки закреплялся от перемещений в горизонтальном направлении. Расчетное сопротивление стали принималось равным $R_y = 230$ МПа. Принято условие, что в аварийной ситуации балка должна сохранять свою целостность.

Задача расчета состояла в определении следующих предельных значений нагрузки: $q_{1\sigma}$ - нагрузка, соответствующая первой группе нормативных ПС, т.е., условию прочности по нормальным напряжениям с ограничением работы балки упругой стадией работы материала; $q_{1\tau}$ - то же по касательным напряжениям; q_{cr1} - нагрузка, соответствующая потере местной устойчивости крайнего отсека; q_{cr2} - то же среднего отсека; q_{3p1} - нагрузка, соответствующая пластификации всего сечения балки (образование шарнира пластичности). Исходя из физических соображений, можно считать, что достижение нагрузкой величины q_{3p1} означает полное исчерпание несущей способности рассматриваемой балки, но целостность балки

сохраняется. Т.е., это и есть максимальное значение нагрузки, которое может быть допустимо для балки в аварийной ситуации. Ниже приводятся вычисления предельных значений q для балки с толщиной стенки $t=10$ мм.

Из условия прочности по нормальным напряжениям значение $q_{1\sigma}$ можно определить, считая, что согласно нормативным требованиям в предельном состоянии максимальные нормальные напряжения в наиболее нагруженной точке балки становятся равными расчетному сопротивлению стали R_y .

Значение изгибающего момента, соответствующее принятому условию:

$$M_I = W_x \cdot R_y = 26859,5 \cdot 23 = 617768,5 \text{ кН} \cdot \text{см} \\ = 6177,7 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Тогда значение $q_{1\sigma}$:

$$q_{1\sigma} = \frac{8 \cdot M_I}{L^2} = \frac{8 \cdot 6177,7}{21,6^2} = 105,9 \text{ кН/м.}$$

В такой же постановке нормативное условие прочности по касательным напряжениям в развернутом виде будет представлено условием:

$$\frac{Q \cdot S_x \cdot \gamma_n}{I_x \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} \leq 1,$$

откуда после вычислений геометрических характеристик сечения:

$$Q_I = \frac{J_x \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c}{S_x \cdot \gamma_n} = \frac{2484503,8 \cdot 1,0 \cdot 13,34 \cdot 1,0}{15000 \cdot 1,0} = \\ = 2209,5 \text{ кН,}$$

$$(R_s = 0,58 \cdot R_y = 0,58 \cdot 230 = 133,4 \text{ МПа} = \\ = 13,34 \text{ кН/см}^2).$$

А предельное значение погонной нагрузки $q_{1\tau}$, определенное по касательным напряжениям:

$$q_{1\tau} = \frac{2 \cdot Q_I}{L} = \frac{2 \cdot 2209,5}{21,6} = 204,6 \text{ кН/м.}$$

Местная устойчивость стенки балки при нагружении ее равномерным по всей длине давлением будет определяться по формуле:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1,$$

и проверка устойчивости должна проводится в одном из крайних (опорных) отсеков (там будет максимальное значение поперечной силы) и в одном из центральных отсеков (максимальное значение изгибающего момента). Проведенные вычисления показывают, что для рассматриваемого случая потеря местной устойчивости в опорных отсеках начинается при $q_{1(cr)}=81,5$ кН/м, а в центральном отсеке при $q_{2(cr)}=57,6$ кН/м.

Предельное значение q_{3pl} может быть определено по формуле:

$$M_p = W_{x,pl} \cdot R_y,$$

где $W_{x,pl}$ для полностью пластифицированного сечения будет определяться по формуле:

$$W_{x,pl} = (S_H + S_B) = 2 \cdot (b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_w + t_f}{2}\right) + \\ + t_w \cdot \frac{h_w}{2} \cdot \left(\frac{h_w}{4}\right)) = 2 \cdot (48 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{180 + 2,5}{2}\right) + \\ + 1,0 \cdot \frac{180}{2} \cdot \frac{180}{4}) = 30000 \text{ см}^3.$$

И тогда:

$$M_p = W_x \cdot R_y = 30000 \cdot 23 = 690000 \text{ кН} \cdot \text{см} = \\ = 6900 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$q_{3pl} = \frac{8 \cdot M_p}{L^2} = \frac{8 \cdot 6900}{21,6^2} = 118,3 \text{ кН/м.}$$

Отношение предельной нагрузки, определяющей полное исчерпание несущей способности балки, т.е., нагрузки, по которой можно считать балку в аварийных ситуациях, к наименьшей предельной нагрузке, определяемой нормами [7] (в данном случае это будет $q_{2(cr)}$) будет равно $q_{3pl}/q_{2(cr)}=118,3/57,6=2,05$. Это означает, что, если в аварийной ситуации нагрузка возрастает не более, чем в 2,05 раза, сечение балки можно оставлять таким же, как и при расчете на обычные проектные ситуации.

В таблице 1 приведены результаты расчетов по приведенному выше алгоритму для таких же балок, но с разной толщиной стенки.

Таблица 1.

Предельные значения нагрузок / Limits loads, кН/м

t, мм	$q_{1\sigma}$	$q_{1\tau}$	$q_{1(cr)}$	$q_{2(cr)}$	q_{3pl}	$\frac{q_{3pl}}{q_{min}}$
10	105,9	204,6	81,5	57,6*	118,3	2,05
12	110,6	213,7	140,5	95,6*	124,3	1,30
14	115,0*	222,2	222,3	145,0	130,4	1,13
16	119,1*	230,1	584,5	204,2	136,5	1,15
18	123,5*	238,6	859,0	280,4	142,8	1,16

Примечание: в таблице индексом * помечены минимальные значения предельных нагрузок по нормативным ПС.

Из таблицы видно, что во всех случаях расчет балок по принятому для аварийных ситуаций алгоритму, дает более высокие значения предельно допустимой нагрузки. Особенно ярко данный эффект проявляется по отношению к тонкостенным конструкциям.

Следует отметить, что применительно к строительным металлоконструкциям и с позиций

нормативного документа [7] приведенные здесь расчетные выкладки, по существу, сводятся к тому, что если в обычных проектных ситуациях какой-либо конструктивный элемент считается по 1-му классу НДС, то в некоторых аварийных ситуациях его расчет допускается и следует проводить по 3-му классу (см.п.5.3.6 [7]). Вместе с тем, нужно иметь в виду, что в действительности полное исчерпание несущей способности рассмотренных балок, равно как и любых других элементов, может наступить при нагрузках, несколько меньших $q_{зр}$, что может быть обусловлено возникновением нелинейности в общих деформациях при появлении участков с потерей местной устойчивости. Изучение данного эффекта требует применения мощных программных комплексов типа ANSYS, Nastran и др.

Выводы

1. Методы расчета конструкций в аварийных ситуациях должны отличаться от их расчета в обычных проектных ситуациях не только специфическим учетом действующих нагрузок, но и принятием в основу расчетов иных физических моделей предельных состояний.
2. В целом ряде случаев расчет конструкций в аварийных ситуациях может проводиться по полному исчерпанию несущей способности, что позволит существенно снизить материалоемкость и стоимость конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров Е.А. Проблемы нормативного обеспечения надежности строительных металлоконструкций /Е.А.Егоров// Вісник академії.-Дніпропетровськ: ПДАБА, 2008.-№10.-С.7-12.
2. Егоров Е.А. Дифференцированный учет факторов изготовления и эксплуатации при проектировании и диагностике стальных резервуаров /Е.А.Егоров // Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее. VIII Українська науково-технічна конференція. Зб. Доповідей, ч.2.-К.: Сталь, 2004.-С.224-233.
3. Егоров Е.А. Исследования резервуарных конструкций: основные результаты и перспективы / Е.А.Егоров // Вісник академії.-Дніпропетровськ: ПДАБА, 2000.-№12.-С.30-33.
4. Горохов Е. В. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции/Е.В.Горохов, С.Н.Шаповалов. – М.: Стройиздат, 1994. – С. 481.
5. Королев В. П. Задача нормирования коэффициента надежности противокоррозионной защиты для системы «Нагрузка-Конструкция-Среда»/В.П.Королев, Р.Г.Толстяков // Вестник ДонГАСА. Вып. 98-4 (12). Строительные коуструкци, здания и сооружения.-Макеевка, 1998.-С. 31-37.
6. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев. Минстрой Украины. 2006. – 87с.
7. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Киев. Мінрегіон України, 2014. – 202с.
8. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М., 2002.
9. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. М., 2005.
10. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. М., 2006.

REFERENCES

1. Egorov EA Regulatory issues of reliability of metal construction /E.A.Egorov// News akademii.-Dnipropetrovsk: Pdaba, 2008.-№10.-S.7-12. Egorov EA General principles of estimates the technical state of construction steel in service / E.A.Egorov // ~ Sat. nach.tr. Construction, Materials, mashine engineering.-Dnepropetrovsk, 2005.-Vyp.35.-S.213-218.
2. Egorov EA Differentiated consideration of manufacturing and operating factors in the design and diagnosis of steel tanks /E.A.Egorov // Metal structures: a look into the past and future. VIII Ukrainian Scientific Conference. ST. Reports. ch.2. K. : Steel, 2004-S.224-233.
3. Egorov EA Studies tank designs: main results and prospects / E.A.Egorov // News akademii.-Dnipropetrovsk: Pdaba, 2000.-№12.-S.30-33.
4. Gorokhov EV Durability of steel structures under reconstruction / E.V.Gorokhov, S.N.Shapovalov. - M. : Stroyizdat, 1994. - S. 481.
5. Korolev VP task of rationing reliability coefficient for corrosion protection system "Load-Construction-Environment" /V.P.Korolev, R.G.Tolstyakov // Herald DonGASA. Vol. 98-4 (12). Construction kostruktsi, buildings and sooruzheniya.-Makiyivka, 1998.-S. 31-37.
6. DBN B.1.2-2: 2006 Loads and effects. Design Standards. Kiev. Ministry of Construction of Ukraine. 2006 - 87s.
7. DBN V.2.6-198: 2014 Stalevi konstruktsii. Normie proektuvannya. Kiev. Minregion Ukraïni, 2014 - 202c.
8. Advice on protection of residential frame buildings during emergencies. Moscow, 2002.
9. Guidelines for the Protection of monolithic apartment buildings against progressive collapse. Moscow, 2005.
10. Recommendations for the protection of high-rise buildings from the progressive collapse. Moscow, 2006.