

## Оценка устойчивости зданий к барическим воздействиям



**Ю.В. Гамера,**  
канд. физ.-мат. наук,  
вед. науч. сотрудник



**С.В. Овчаров,**  
канд. техн. наук,  
нач. лаборатории



**А.В. Рыбаков,**  
канд. техн. наук,  
ст. науч. сотрудник

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

**Ключевые слова:** авария, взрыв, дефлаграционное горение, детонация, параметры барического воздействия.

Один из важных аспектов исследования формирования и воздействия на окружающую среду ударно-волновых нагрузок при авариях с разгерметизацией оборудования на опасных производственных объектах — определение зон разрушения. При этом исключительно важен вопрос установления критерия разрушения, зависящего в общем случае от характеристик ударно-волновой нагрузки — избыточного давления и импульса [1]. При проведении экспресс-анализа последствий ударно-волновых воздействий во многих случаях зависимость зон разрушения от импульса исключают из рассмотрения, а критерий разрушения строят по одному лишь избыточному давлению [2, 3]. Цель настоящей работы — определение вида импульсных воздействий, для которых указанный подход (учет только избыточного давления) считается оправданным, и установление процессов, при протекании которых целесообразно критерий разрушений основывать не на избыточном давлении, а на импульсе.

Вначале рассмотрим характеристики зон разрушения по однопараметрическому критерию — избыточному давлению, которые приведены в наиболее часто цитируемых источниках [2–5] при составлении расчетно-пояснительных записок к декларациям промышленной безопасности. В работе [2] для взрыва внутри помещения (вспышкообразного дефлаграционного горения) в качестве критериев разрушения здания приняты значения избыточного давления (табл. 1).

На основе совместного анализа зависимостей импульса от избыточного давления в процессах дефлаграционного горения в открытом пространстве и помещениях, физического и химического (детонация) взрывов и ( $P-I$ )-диаграмм рассмотрен вопрос об устойчивости кирпичных зданий к барическим воздействиям. Найдены условия, при которых оправданной считается оценка устойчивости зданий по избыточному давлению. Получены формулы для расчета размеров зон разрушения зданий для адиабатических взрывов.

*Based on the joint analysis of pulse dependences on excess pressure in the processes of deflagration combustion in the open space and premises, the physical and chemical (detonation) explosions, and ( $P-I$ )-diagrams the issue was reviewed on brick building resistance to baric effects. The conditions were found at which the assessment of building stability on excessive pressure is considered to be justifiable. The formulas were obtained for calculating destruction areas sizes in case of adiabatic explosions.*

Несколько иная классификация зон разрушения принята в ПБ 09-540—03 [3], где для оценки воздействия взрыва парогазовых сред применяется тротиловый эквивалент  $W_T$ , рассчитываемый по формуле

$$W_T = \frac{0,4q'}{0,9q_r}zm, \quad (1)$$

где 0,4 и 0,9 — доля энергии взрыва соответственно паровоздушной среды и тринитротолуола (ТНТ), затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны;  $q'$  — удельная теплота сгорания парогазовой среды, кДж/кг;  $q_r$  — удельная энергия взрыва ТНТ, кДж/кг;  $z$  — доля приведенной массы парогазовых веществ, участвующих во взрыве;  $m$  — общая масса горючих паров (газов) взрывоопасного парогазового облака, кг.

Границы зон разрушения «характеризуются значениями избыточных давлений по фронту ударной волны  $\Delta P$  и соответственно безразмерным коэффициентом  $K$ » [3] (табл. 2). При известном значении  $W_T$  радиус зон разрушения  $R$  вычисляют по формуле

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}. \quad (2)$$

Описание степени разрушения, соответствующей каждому классу зоны разрушения, в ПБ 09-540—03 [3] не приводится. Однако такое описание может быть восстановлено из оригинальной

Критическое избыточное давление, кПа	Степень разрушения	Характер разрушений
1–3	Слабая	Разрушение заполнения оконных и дверных проемов; повреждения внутренних перегородок в виде трещин, отслоений и выколов штукатурки, а также самонесущих кирпичных стен и стеновых панелей из легких бетонов в виде трещин
3–6	Средняя	Разрушение окон, дверей, внутренних перегородок, отдельных участков самонесущих кирпичных стен и отдельных стеновых панелей из легких бетонов; повреждения отдельных участков мягкой кровли в виде разрывов водоизоляционного ковра, а также несущих кирпичных стен и приваренных на монтаже к стропильным конструкциям плит покрытия в виде трещин и остаточных прогибов
6–9	Сильная	Частичное разрушение самонесущих и несущих кирпичных стен, стеновых панелей из легких бетонов и больших площадей мягкой кровли; повреждения (остаточные деформации, трещины, в том числе сквозные, разрушение защитного слоя бетона, выколы бетона на опорных участках и др.) отдельных основных несущих конструкций (плиты покрытия и перекрытия, балки, ригели, колонны каркаса) и узлов их крепления; частичное обрушение конструкций покрытия
12–15	Полное разрушение	Разрушение несущих кирпичных стен и стеновых панелей; полное обрушение конструкций перекрытия

Таблица 2

Класс зоны разрушения	$K$	$\Delta P$ , кПа
1	3,8	$\geq 100$
2	5,6	70
3	9,6	28
4	28,0	14
5	56,0	$\leq 2$

работы [6], в которой приведено следующее соответствие безразмерного коэффициента и степени разрушения:

$K = 3,8$ ;  $\Delta P \geq 100$  кПа — полное разрушение зданий;

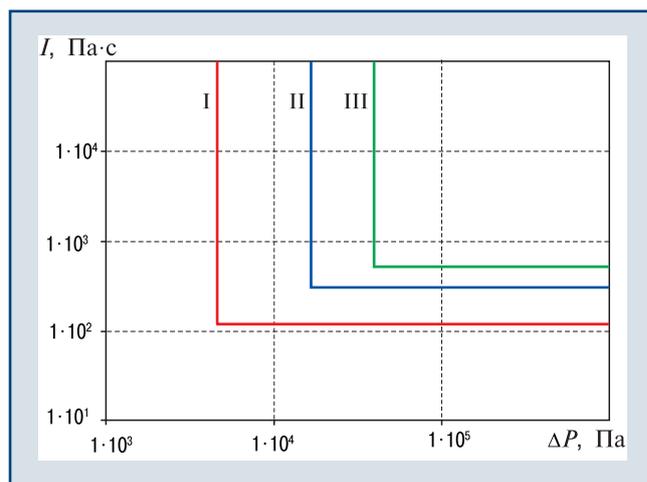
$K = 5,6$ ;  $\Delta P = 70$  кПа — 50 % зданий разрушено;

$K = 9,6$ ;  $\Delta P = 28$  кПа — здания непригодны для обитания;

$K = 28$ ;  $\Delta P = 14$  кПа — умеренное разрушение, повреждение внутренних малопрочных перегородок;

$K = 56$ ;  $\Delta P \leq 2$  кПа — малое повреждение зданий, разбито более 10 % стекол.

Выясним, насколько однопараметрические (по избыточному давлению) критерии, приведенные в [2, 3], оправданны с точки зрения двухпараметрического анализа (по избыточному давлению и импульсу). При корректном исследовании вопроса об устойчивости объектов к барическим воздействиям для каждого отдельного здания или помещения строится ( $P-I$ )-диаграмма (линия равновероятного повреждения), по которой при известных значениях избыточного давления и импульса  $I$  и определяется степень разрушения зданий. На рис. 1 представлена такая диаграмма для кирпичных промышленных зданий, построенная на основе обобщенных данных по результатам разрушений зданий при бомбардировках во время Второй мировой войны [6]. Поскольку взрывы при бомбардировках были как внутренними, так и внешними, то данная диаграм-



▲ Рис. 1. Диаграмма «давление — импульс» равновероятного поражения для кирпичных зданий [4]

ма иллюстрирует осредненную степень разрушения зданий для обоих типов взрывов. Линия I соответствует границе области минимальных повреждений, линия II — границе области значительных повреждений (повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку), а линия III — границе области частичного разрушения (50–75 % стен разрушено или находится на грани разрушения). Для трех различных линий равной степени повреждения, представленных на рис. 1, можно выделить участки, соответствующие режимам квазистатического (вертикальные асимптоты) и импульсного (горизонтальные асимптоты) приложения нагрузки. Степень повреждения объекта увеличивается с ростом давления и импульса. Построенная в ( $P-I$ )-координатах диаграмма разрушений обладает тем замечательным свойством, что она характеризует только приемник нагрузки и не конкретизирует тип источника взрыва и особенности распространения волны сжатия.

В Великобритании эмпирическая ( $P-I$ )-диаграмма применяется для оценки степени повреждения и некирпичных зданий, небольших административных построек и легких промышленных сооружений каркасной конструкции. При этом предполагают, что все эти строения обладают такими же прочностными характеристиками, как и кирпичные здания [7].

Чтобы судить о степени разрушения зданий и помещений по приведенной ( $P-I$ )-диаграмме, достаточно нанести на нее точку, соответствующую значениям избыточного давления  $\Delta P$  и импульса  $I$ , реализуемых в месте расположения здания во взрывном или псевдовзрывном (дефлаграционное горение) процессе.

На рис. 2 приведены характерные кривые, описывающие следующие физические процессы (энергетика всех процессов одинакова): 1 — детонация в стандартной атмосфере (по модели Международной стандартной атмосферы) топливовоздушной смеси, рассчитанная по методике [1]; 2 — газовый взрыв, рассчитанный в соответствии с моделью, приведенной в работах [8, 9]; 3 — дефлаграционное сгорание в стандартной атмосфере стехиометрической метановоздушной смеси, рассчитанное по методике [1] при следующих условиях: а — скорость фронта горения 300 м/с (максимальное значение для метановоздушной смеси); б — скорость горения лежит в 5-м диапазоне; с — скорость горения лежит в 6-м диапазоне; d — объект воздействия (здание) находится внутри облака на расстоянии от центра  $R_x \leq 0,34$ ; 4 — дефлаграционное сгорание стехиометрической метановоздушной смеси в негерметичном помещении (с наличием срабатывающих легкообъемных конструкций), рассчитанное по методике, представленной в работах [10, 11] (подразумевается, что скорость фронта горения не превышает 40 м/с, а максимально достижимое избыточное давление меньше 0,1 МПа).

в явный вид  $\Delta P(I)$ . Для кривых 1, 2, 3а, 3б, 3с параметром зависимостей является расстояние от центра взрыва; для 3d такой параметр — скорость горения (в качестве  $\Delta P$  и  $I$  используются максимально достижимые при дефлаграционном горении избыточное давление и импульс); для кривой 4 — эффективный энергозапас горючей смеси. (В приведенном описании кривых использована терминология [1].)

Кроме кривых 1–4 на рис. 2 нанесены линии ( $P-I$ )-диаграммы.

Анализ представленных на рис. 2 данных позволяет утверждать, что оценка устойчивости к барическим нагрузкам промышленных кирпичных зданий и близких к ним по прочностным характеристикам небольших административных построек и легких промышленных сооружений каркасной конструкции при аварии с участием природного газа по одному параметру (избыточному давлению) полностью оправдана в случаях:

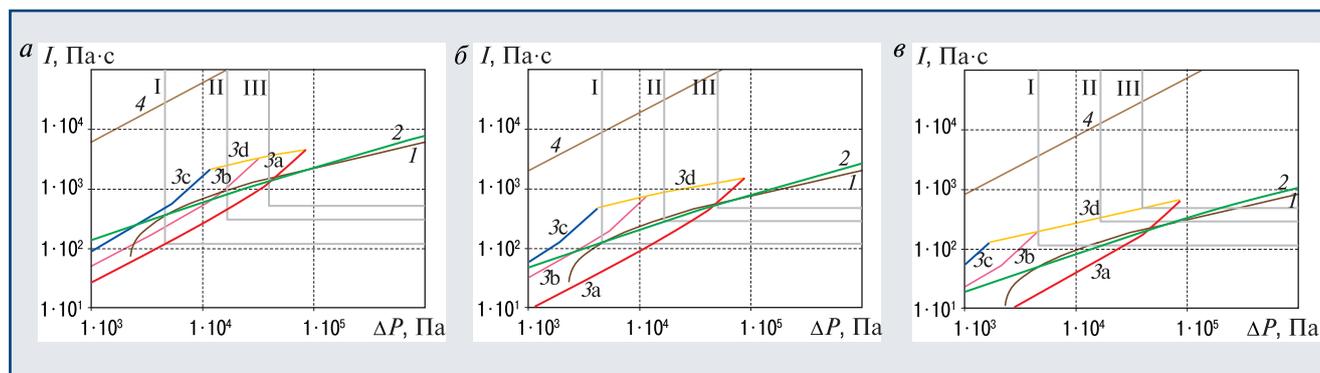
дефлаграционного горения внутри помещения и в открытой атмосфере, когда здание расположено внутри облака (кривые 3d, 4);

взрывных процессов (кривые 1, 2), когда тротиловый эквивалент взрыва превышает критическое значение  $3,32 \cdot 10^3$  кг (кривые 1, 2, рис. 2, б);

частичного разрушения зданий (линия III) при дефлаграционном горении с максимальной скоростью метановоздушной смеси при эффективном энергозапасе смеси больше  $1,5 \cdot 10^4$  МДж, что соответствует сгоранию 300 кг природного газа (кривая 3а, рис. 2, б);

любой степени разрушения зданий от дефлаграционного горения в атмосфере при превышении массы сгоревшего газа 7000 кг (эффективный энергозапас смеси  $3,5 \cdot 10^5$  МДж).

Заметим, что при недостижимой в случае горения метановоздушной смеси скорости горения 700 м/с кривая 3d всегда пересекает кривую 1 в точке с абсциссой  $4,63 \cdot 10^5$  Па.



▲ Рис. 2. Зависимость избыточного давления от импульса для физических процессов, связанных с образованием барических нагрузок:

а, б, в — выделяемая в процессах энергия соответственно  $3,5 \cdot 10^5$ ;  $1,5 \cdot 10^4$ ;  $1 \cdot 10^3$  МДж

Отметим, что все перечисленные выше кривые строили путем перевода неявно заданных функций  $\Delta P(\text{par})$  и  $I(\text{par})$ , где par — параметры зависимостей,

Если для взрывных процессов указанное выше условие не выполнено, то однопараметрический анализ устойчивости более оправданно прово-

дуть не по избыточному давлению, а по импульсу (рис. 2, в). При этом ожидаемое избыточное давление при одной и той же степени повреждения будет выше давления на силовой асимптоте. Заметим, что предложение о необходимости проводить расчеты устойчивости операторных по импульсной нагрузке для взрывов на химических производствах ранее уже высказывалось [12]. Тритиловые эквиваленты адиабатических взрывов типичного оборудования со сжатым газом, используемого в газовой отрасли, заметно меньше критического значения  $3,32 \cdot 10^3$ . Так, адиабатическому взрыву газопровода с рабочим давлением 7,5 МПа и внутренним диаметром 1 м соответствует тритиловый эквивалент 39,2 кг. Данное обстоятельство позволяет определить зоны разрушения для кирпичных зданий при разгерметизации оборудования со сжатым газом (табл. 3) по модели, предложенной в работах [8, 9, 13].

внутри облака стехиометрической метановоздушной смеси;

адиабатический взрыв с тритиловым эквивалентом, превышающим  $3,32 \cdot 10^3$  кг ТНТ;

дефлаграционное горение метановоздушной смеси в открытой атмосфере, когда ее эффективный энергозапас превышает  $3,5 \cdot 10^5$  МДж.

2. Установлено, что для аварий с разгерметизацией оборудования, содержащего сжатый природный газ, оценки размеров зон разрушения от первичной ударной волны (адиабатического взрыва) кирпичных и близких к ним по прочностным характеристикам зданий, построенных из других материалов, более оправданно проводить не по избыточному давлению, а по импульсу (оценка по избыточному давлению будет консервативной). Для указанного случая выведены расчетные формулы для определения размеров зон разрушения в зависимости от типа

Таблица 3

Граница зоны повреждения	Доля повреждения здания [13]	Импульс, Па · с	Зависимость размеров зоны разрушения от параметров оборудования	
			Трубопровод	Сосуд
I	0,15	$1,2 \cdot 10^2$	$1,23 \cdot 10^{-1} \left( d_0 \sqrt{\frac{P_{g0}}{P_0}} \right)^{2,093}$	$1,97 \cdot 10^{-1} \left\{ \frac{V_0 P_{g0}}{P_0} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{g0}} \right)^{2/7} \right] \right\}^{0,698}$
II	0,40	$3,0 \cdot 10^2$	$4,39 \cdot 10^{-2} \left( d_0 \sqrt{\frac{P_{g0}}{P_0}} \right)^{2,093}$	$7,04 \cdot 10^{-2} \left\{ \frac{V_0 P_{g0}}{P_0} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{g0}} \right)^{2/7} \right] \right\}^{0,698}$
III	0,80	$5,0 \cdot 10^2$	$2,51 \cdot 10^{-2} \left( d_0 \sqrt{\frac{P_{g0}}{P_0}} \right)^{2,093}$	$4,03 \cdot 10^{-2} \left\{ \frac{V_0 P_{g0}}{P_0} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{g0}} \right)^{2/7} \right] \right\}^{0,698}$

**Примечания:** 1. Таблица применима при выполнении условий:  $d_0 \sqrt{P_{g0} / P_0} \leq 38$  — для трубопровода,  $V_0 P_{g0} / P_0 \leq 2,79 \cdot 10^4$  — для сосуда.

2. Символ  $d_0$  — внутренний диаметр газопровода, м;  $P_{g0}$  — рабочее давление газопровода, Па;  $P_0$  — атмосферное давление, Па;  $V_0$  — внутренний объем сосуда, м<sup>3</sup>.

Полученные выше результаты позволяют проводить инженерные оценки устойчивости кирпичных зданий и определять безопасные, с точки зрения ударно-волновых нагрузок, расстояния при адиабатических взрывах, сопровождающих аварии с разгерметизацией оборудования, содержащего сжатый природный газ.

### Выводы

1. На основе совместного анализа ( $P-I$ )-диаграмм кирпичных зданий и ( $P-I$ )-кривых, описывающих физические процессы дефлаграционного горения и взрыва, найдены условия, при которых однопараметрическая (по избыточному давлению) оценка устойчивости зданий данного типа полностью оправдана. Эти условия:

дефлаграционное горение внутри помещения и в открытой атмосфере, когда здание расположено

оборудования (сосуд или трубопровод) и его характеристик.

### Список литературы

1. РД 03-409—01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. — Сер. 27. — Вып. 2. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013.
2. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика. — М.: Страховая группа «Лукойл», 2000. — 186 с.
3. ПБ 09-540—03. Общие правила взрывопожаробезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. — Сер. 09. — Вып. 37. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013.
4. Расчет зон разрушений зданий и сооружений при внешних взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах / К.В. Ефремов,

М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 70–77.

5. *СТО Газпром 2-2.3-400—2009*. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром»/ ОАО «Газпром»: Введ. 05.10.2009. — М.: ООО «Газпром экспо», 2010.

6. *Jarrett D.E.* Derivation of British Explosive Safety Distances// *Annals of the New York Academy of Sciences*, 152, Article 1, 1968. — P. 18–35.

7. *Взрывные явления. Оценка и последствия/ У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.; В 2-х кн. — Пер. с англ. Я.Б. Зельдовича и Б.Е. Гельфанда. — М.: Мир, 1986.*

8. *Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фортвов В.Е.* Энергетические характеристики взрыва и параметры ударных волн в воздухе при детонации водородосодержащих облаков в свободной атмосфере. Препринт. — Черноголовка, 1995. — 85 с.

9. *Гамера Ю.В., Овчаров С.В.* Модель образования и распространения первичной воздушной волны при аварии оборудования, находящегося под высоким давлением// *Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 12. — С. 74–78.*

10. *Мольков В.В.* Динамика сгорания газа в негерметичном сосуде. Дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17. М., 1983.

11. *ГОСТ Р 12.3.047—98*. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля; Введ. 01.01.2000. — М.: Изд-во стандартов, 1998.

12. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989. — 672 с.

13. *СТО РД Газпром 39-1.10-084—2003*. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром»; Введ. 12.11.2013. — М.: «ИРЦ Газпром», 2003.

Y\_Gamera@vniigaz.gazprom.ru



## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ

Без подписанного лицензионного договора и в случае невыполнения пп. 2–5 статьи к публикации в журнале «Безопасность труда в промышленности» не принимаются

1. В связи с введением части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации (раздел VII «Права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации») представляемые в журнал статьи должны сопровождаться лицензионным договором о передаче ЗАО НТЦ ПБ (издатель журнала) неисключительных авторских прав. Образец лицензионного договора размещен на сайте журнала [btpnadzor.ru](http://btpnadzor.ru). Его можно получить по электронной почте ([redbtp@safety.ru](mailto:redbtp@safety.ru)).

2. В связи с требованием Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Министерства образования и науки Российской Федерации (информационное сообщение от 14.10.2008 № 55.1-132) о необходимости размещения журналов, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК, в открытом доступе в сети Интернет (в базе данных Российской универсальной научной электронной библиотеки) и наполнения базы данных Российского индекса научного цитирования и других баз данных научного цитирования статья должна содержать: индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК); имя, отчество (полностью) и фамилию автора (авторов), место работы и занимаемую должность; ученую степень или звание; название; аннотацию; ключевые слова; текст статьи; список литературы; иллюстрации и подписанные фотографии авторов (TIF, JPG); контактную информацию (адрес электронной почты).

3. Объем статьи (включая иллюстрации, таблицы и список литературы) не должен превышать 12 с. машинописного текста. Текст статьи должен

быть напечатан через 1,5 интервала в редакторе WinWord (шрифт Times New Roman, кегль 12) на одной стороне стандартного листа формата А4.

4. Статья, подписанная автором (авторами), должна быть представлена в электронном (файл WinWord) и в распечатанном виде.

5. В конце статьи следует указать домашний или служебный телефон, почтовый адрес.

6. Единицы измерения величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ), а используемые в статье термины, определения и условные обозначения — действующим ГОСТам.

7. Формулы должны быть набраны в редакторе формул. После формулы следует пояснить входящие в нее параметры в последовательности их упоминания с указанием единиц измерения.

8. Рисунки также представляются отдельными файлами (не вставленными в WinWord): тоновые — в растровом формате (TIF, JPG, разрешение не ниже 300 dpi), графический материал — в векторном формате (WMF, EPS и т.д.) или представлены файлами с расширением, соответствующим графическим редакторам, в которых они выполнены.

9. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5—2008.

10. За публикацию научно-технических статей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Один экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору.

11. Статьи рецензируются. Отрицательные рецензии доводятся до сведения авторов.

12. Материалы, представленные в редакцию, авторам не возвращаются.