

А. А. КОМАРОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов, НТЦ "Взрывоустойчивость", Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26, e-mail: bzbb@mail.ru)

В. В. КАЗЕННОВ, д-р техн. наук, профессор, НТЦ "Взрывоустойчивость", Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26, e-mail: mishuev@mail.ru)

А. А. ГУСЕВ, канд. техн. наук, профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Н. В. ГРОМОВ, канд. техн. наук, зав. лаборатории газодинамики горения и взрыва НТЦ "Взрывоустойчивость", Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

УДК 614.83

КРИТЕРИЙ КВАЗИСТАТИЧНОСТИ ВЗРЫВНОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Приведен и обоснован критерий квазистатичности избыточного давления при внутреннем взрыве газозвдушной смеси. Показано, что в случае квазистатичности процесса аварийного взрыва нагрузки зависят только от времени и не зависят от пространственных координат. Приведены расчеты, показывающие выполнение критерия квазистатичности давления взрыва. Установлено, что при частичной загазованности больших помещений при взрыве будет наблюдаться нарушение квазистатичности взрывного давления, а это, в свою очередь, приведет к волновому характеру взрывных нагрузок. Дан анализ взрывоустойчивости объекта в случае нарушения квазистатичности взрывного давления.

Ключевые слова: аварийный взрыв; дефлаграция; избыточное давление; критерий квазистатичности; газопаровоздушная смесь.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.56-61

Анализ аварийных взрывов газопаровоздушных смесей (ГПВС) в помещениях различного назначения показывает, что в подавляющем большинстве случаев наблюдается дефлаграционный тип взрывного превращения. Причем процесс взрыва достаточно скоротечен (менее нескольких секунд), поэтому аварийный взрыв (и связанные с ним динамические нагрузки) автоматически относят к существенно нестационарным или волновым процессам. Однако применительно к механике сплошной среды между этими понятиями существует большая разница. Нестационарные процессы делятся на квазистатические и волновые. При квазистатических процессах параметры среды зависят только от времени, но не зависят от пространственных координат. При волновых процессах параметры среды зависят и от времени, и от координат. Указанную классификацию процессов чаще всего используют в термодинамике.

От того, какой процесс аварийного взрыва (квазистатический или волновой) будет наблюдаться, зависит и метод расчета параметров взрыва. Знание критерия квазистатичности процесса взрыва позволяет решить эту задачу.

Критерием квазистатичности процесса (т. е. независимости какого-либо параметра среды от пространственных координат) является существенное превышение времени значительного изменения рассматриваемого параметра системы над временем выравнивания его по системе.

Определим критерий квазистатичности процесса взрыва применительно к некоторому объему с характерным линейным размером L [1].

Скорость притока продуктов взрыва пропорциональна видимой скорости пламени $U_{пл}$, а характерное время взрыва $T_{взр} = L_{взр}/U_{пл}$ (где $L_{взр}$ — характерный размер области продуктов горения по окончании взрыва).

Скорость выравнивания по объему избыточного давления, возникающего при взрыве, пропорциональна скорости распространения звука C , поэтому характерное время установления равновесия или период собственных колебаний воздушной среды в рассматриваемом объеме $T_0 = L/C$. При условии $T_{взр} \gg T_0$ избыточное давление, создаваемое взрывом, будет удовлетворять принципу квазистатичности, т. е. в лю-

бой точке объема избыточное давление в данный момент времени будет иметь примерно одинаковое значение. Другими словами, избыточное давление, распространяющееся со скоростью звука, “успевает” выровняться по всему объему за время заметного перемещения фронта пламени,двигающегося со скоростью $U_{пл}$. При полной загазованности помещения условием квазистатичности процесса взрыва будет соотношение $U_{пл} \ll C$. Учитывая, что при дефлаграционных взрывах видимая скорость пламени значительно меньше скорости звука, получаем, что избыточное давление при аварийном взрыве в большинстве помещений подчиняется принципу квазистатичности. Исключения составляют большие (или протяженные) и частично загазованные объемы (помещения), в которых нарушается принцип квазистатичности, т. е. выполняется условие $T_{взр} \ll T_0$, а значит, возникают волновые процессы. При аварийных взрывах в атмосфере, где характерный размер области, в которой происходит взрыв, практически бесконечный ($L \rightarrow \infty$), в воздушной среде всегда возникают волновые процессы [2].

Приведем более корректное обоснование указанного выше критерия квазистатичности взрывного давления в некотором объеме.

Рассмотрим в линейной постановке (что обусловлено малостью избыточного давления) общие закономерности динамики взрывного давления в рассматриваемом объеме. Пренебрегая вязким трением и диссипацией энергии и учитывая, что видимая скорость пламени существенно меньше скорости звука, из общих уравнений движения газа получаем, что потенциал скорости ϕ описывается следующим волновым уравнением [1, 3]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - C^2 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial Q}{\partial V} C^2 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (1)$$

где ϕ — потенциал скорости; $U = \text{grad } \phi$;

Q — производительность источников, характеризующих приток продуктов взрыва;

V — объем;

$\partial Q / \partial V$ — удельная производительность источников;

$\delta(x)$, $\delta(y)$, $\delta(z)$ — дельта-функции.

Параметр Q определяется по формуле

$$Q = S(t) U_n (\varepsilon - 1) f(t, x_0, y_0, z_0),$$

где $S(t)$ — текущая суммарная площадь фронта пламени;

U_n — скорость нормального горения ГПВС;

ε — степень расширения смеси при сгорании;

$f(t, x_0, y_0, z_0)$ — функция, описывающая поверхность фронта горения.

Принимая, что объем имеет форму параллелепипеда с размерами h, b, l , и учитывая, что на границе объема (область G) должно выполняться условие непротекания $(\partial \phi / \partial n)|_G = 0$ (где n — нормаль к границе; индекс G означает, что производная равна нулю на границе области), из (1) получаем, что потенциал скорости имеет вид (без ограничения общности рассматривается случай центрального воспламенения смеси, т. е. симметричная задача):

$$\phi = \sum A_{nmpk} \cos \frac{\pi x n}{l} \cos \frac{\pi y m}{b} \cos \frac{\pi z q}{h} e^{i \Omega_k t}, \quad (2)$$

где A_{nmpk} — амплитуда гармоники;

n, m, q — порядковые номера гармоники по трем направлениям;

Ω_k — частота созданного (сгенерированного) притоком продуктов сгорания) волнового возмущения;

$$\frac{\Omega_k^2}{C^2} = \sqrt{\left(\frac{\omega_k}{C} \right)^2 - (K_x^2 + K_y^2 + K_z^2)}; \quad (3)$$

ω_k — собственная частота источников (в данном случае собственные частоты функции притока продуктов сгорания); $\omega_k = 2\pi k / T$;

T — общее время процесса взрыва;

k — волновое число;

K_x, K_y, K_z — волновые числа в направлениях x, y, z ; $K_x = \pi n / l$; $K_y = \pi m / b$; $K_z = \pi q / h$.

Из (3) следует [1, 3], что при

$$\omega_k / C < K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 \quad (4)$$

частота Ω_k имеет чисто мнимое значение, а значит, согласно (2) происходит экспоненциальное затухание колебаний.

Физически это означает, что любое возмущение среды с частотой, удовлетворяющей условию (4), быстро затухает, и в каждый момент времени t_0 в помещении будет реализовано давление, характерное для источника с производительностью $Q(t_0)$. Это доказывает принцип квазистатичности избыточного давления, при котором давление представляет собой функцию только времени и не зависит от пространственных координат. Соотношение (4) является критерием соблюдения принципа квазистатичности давления. Только при возмущениях среды, происходящих с частотой, превышающей частоту отсечки $\omega_{отс}$ (термин, принятый в акустике):

$$\frac{\omega}{C} > \frac{\omega_{отс}}{C} = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2, \quad (5)$$

в объеме будут наблюдаться акустические колебания. Минимальное значение частоты отсечки легко определить из формулы

$$\frac{\omega_{\text{отс min}}}{C} = \frac{\pi}{L}, \quad (6)$$

где L — максимальный линейный размер объема;
 $L = \max(h, b, l)$.

Из (6) следует, что максимальное время переходного процесса, приводящего к нарушению квазистатики, определяется из равенства

$$T = 2L/C. \quad (7)$$

Другими словами, если за время T в объеме (помещении) произойдет заметное изменение параметров среды, то только в этом случае возможно появление акустических колебаний [1–3].

Проиллюстрируем принцип квазистатичности избыточного давления взрыва в помещении с характерным линейным размером $L = 10$ м (рис. 1). Время собственных колебаний воздушной среды в помещении составляет $T_0 = L/C \approx 75$ мс.

Расчеты проводились по методикам, основные принципы и допущения которых изложены в [1, 4–7]. Рассматривались два варианта времени развития взрыва: для первого взрыва $T_{\text{взр}} = 5$ мс (частичная загазованность помещения), для второго — $T_{\text{взр}} = 300$ мс (полная загазованность помещения). Для первого взрыва критерий квазистатичности не выполняется ($5 \text{ мс} \ll 75 \text{ мс}$), а значит, в помещении возникают волновые явления. Это хорошо видно из рис. 2, на котором приведен мгновенный профиль поля избыточного давления ΔP в помещении через 40 мс после взрыва.

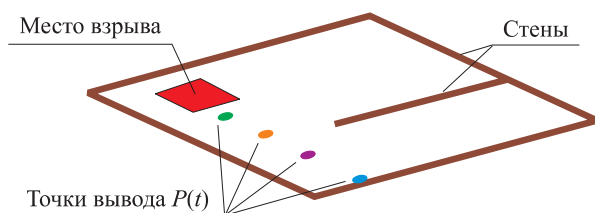


Рис. 1. Схема помещения

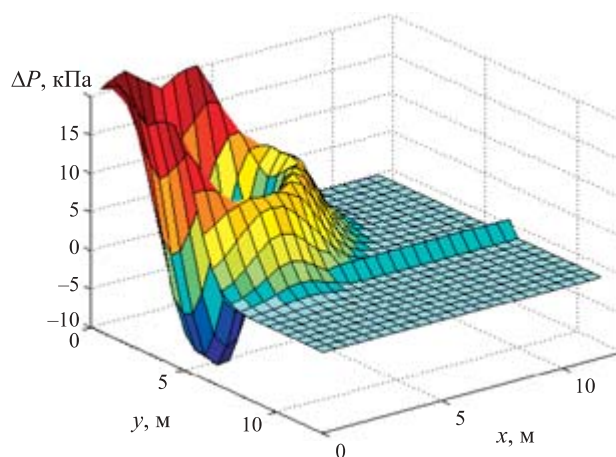


Рис. 2. Поле избыточного давления через 40 мс после взрыва

На рис. 3 представлены временные зависимости избыточного давления в четырех различных точках помещения (см. рис. 1).

Для второго взрыва критерий квазистатичности давления выполняется ($300 \text{ мс} \gg 75 \text{ мс}$), поэтому давление во всех точках помещения в один и тот же момент времени примерно одинаково. Это видно из рис. 4, на котором приведены временные зависимости избыточного давления в различных точках помещения.

Отметим, что в случае волнового характера взрыва в помещении давление в некоторый момент времени может быть значительно больше, чем при квазистатическом характере взрыва.

В вытянутых объемах при распространении фронта пламени в «глухую» стенку, например в шахтах, как правило, начинается вибрация пламени, что связано с гидродинамической неустойчивостью процесса [5], поэтому на собственных частотах объема (длина акустической волны равна характерным размерам объема) возникает акустический резонанс (рис. 5).

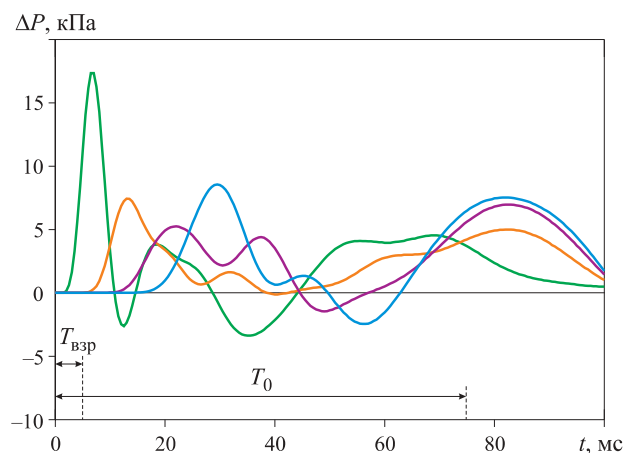


Рис. 3. Временные зависимости взрывного давления в разных точках помещения ($T_{\text{взр}} = 5$ мс, $T_0 = 75$ мс)

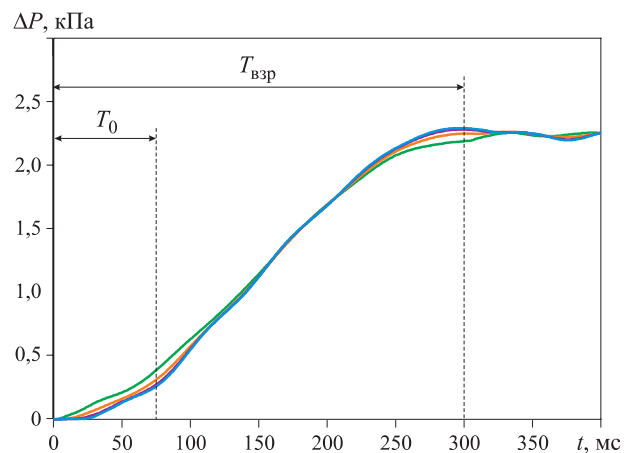


Рис. 4. Временные зависимости взрывного давления в разных точках помещения ($T_{\text{взр}} = 300$ мс, $T_0 = 75$ мс)

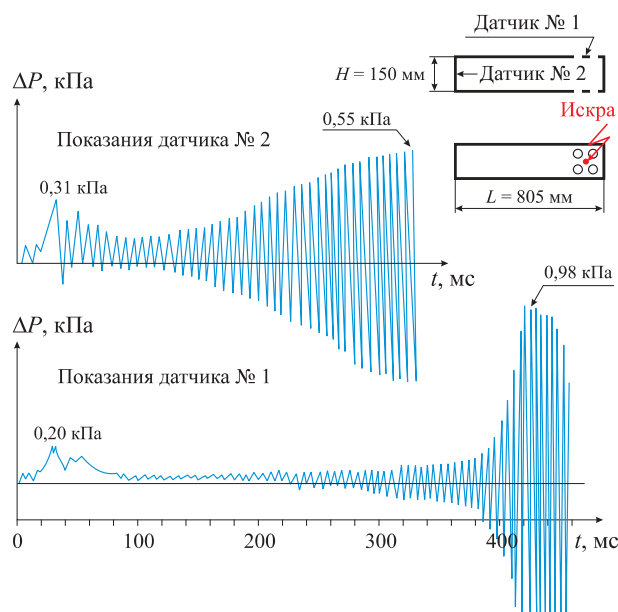


Рис. 5. Зависимость взрывного давления от времени в вытянутой камере при распространении фронта пламени в “глухую” стенку объема

На графике зависимости давления от времени (см. рис. 5) отчетливо виден процесс раскачки и затухания акустических колебаний (резонанса) на первой собственной частоте объема. Со стороны этот процесс воспринимается как завывание пламени.

Таким образом, в помещениях больших габаритных размеров при их частичной загазованности на начальном этапе взрыва ГПВС наблюдается нарушение квазистатичности процесса горения, что приводит к волновому характеру взрывных нагрузок. В динамических характеристиках взрывных нагрузок присутствует отрицательная (по отношению к атмосферному давлению) составляющая — волна разрежения. Воздействие на строительные конструкции волны сжатия (положительная нагрузка) и разрежения (отрицательная нагрузка) является фактором, приводящим к усилению воздействия взрывных нагрузок на строительные конструкции.

Пример разрушения торцевой и боковой стенок многоярусного склада замороженных продуктов питания при локальном внутреннем аварийном взрыве приведен на рис. 6. Свидетели аварии слышали характерное низкочастотное завывание, которое сопровождалось обрушением стеновых панелей склада.

Выводы

Приведен и обоснован критерий квазистатичности нагрузок, формирующихся при аварийных взры-



Рис. 6. Последствия локального аварийного взрыва в складском помещении

вах. При выполнении данного критерия взрывные нагрузки зависят только от времени и не зависят от пространственных координат. При нарушении приведенного критерия взрывные нагрузки носят волновой характер.

Показано, что возникновение волновых процессов при аварийных взрывах (нарушение критерия квазистатичности) в основном характерно для протяженных зданий и помещений или для больших и частично загазованных помещений.

Приведены примеры формирования взрывных нагрузок, носящих явно выраженный волновой характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров А. А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МГСУ, 2001. — 492 с.

2. Абросимов А. А., Комаров А. А. Механизмы формирования взрывных нагрузок на территории нефтеперерабатывающих комплексов // Нефть, газ и бизнес. — 2002. — № 6 (50). — С. 58–61.
3. Голдстейн М. Е. Аэроакустика. — М. : Машиностроение, 1981. — С. 294.
4. Хуснутдинов Д. З., Мишуев А. В., Казеннов В. В., Комаров А. А., Громов Н. В. Аварийные взрывы газозвдушных смесей в атмосфере. — М. : МГСУ, 2014. — 80 с.
5. Казеннов В. В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МГСУ, 1997. — 445 с.
6. Комаров А. А. Расчет газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках // Пожаровзрывобезопасность. — 2002. — Т. 11, № 5. — С. 15–18.
7. Абросимов А. А., Комаров А. А. Мероприятия, обеспечивающие безопасные нагрузки при аварийных взрывах в зданиях со взрывоопасными технологиями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2002. — № 4. — С. 48–51.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Byakov A. V. The analysis of oil suppression by aqueous film forming foam through a gas-salt layer of water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1073–1076. — P. 2353–2357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.2353.
9. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1070–1072. — P. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
11. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms // Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations. — Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. — P. 800–808.

Материал поступил в редакцию 13 мая 2015 г.

Для цитирования: Комаров А. А., Казеннов В. В., Гусев А. А., Громов Н. В. Критерий квазистатичности взрывного давления газопаровоздушных смесей в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 8. — С. 56–61. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.56-61.

English

CRITERION FOR QUASI-STATIC CONDITIONS FOR CONFINED BLAST PRESSURE OF A GAS-AIR MIXTURE IN PREMISES

KOMAROV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor of Hydraulics and Water Resources Department, Scientific and Technical Center "Explosion Stability", Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: bzbb@mail.ru)

KAZENNOV V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific and Technical Center "Explosion Stability", Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation, e-mail: mishuev@mail.ru)

GUSEV A. A., Candidate of Technical Sciences, Professor of Hydraulics and Water Resources Department, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

GROMOV N. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Gas-Dynamics of Burning and Explosion Laboratory, Scientific and Technical Center "Explosion Stability", Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

The criterion for quasi-static conditions for overpressure caused by internal air-gas mixture blast is substantiated in the article. In this process the blast pressure is considered as a function of time and does not depend on spatial coordinates.

The article reveals calculations justifying the criterion for quasi-static conditions for the blast pressure. It is shown that the blast in large premises partially filled with a gas may not comply with quasi-static conditions, which leads to the wave behavior of the blast loads. The blast resistance analysis for the facility is given for the case of quasi-static conditions violation.

Keywords: emergency blast; deflagration; overpressure; criterion for quasi-static conditions; gas-air mixture.

REFERENCES

1. Komarov A. A. *Prognozirovaniye nagruzok ot avariynykh deflagratsionnykh vzryvov i otsenka posledstviy ikh vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya: dis. d-ra tekhn. nauk* [Forecasting of emergency deflagration explosion loads and aftermath estimation of their effects on buildings. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2001. 492 p.
2. Abrosimov A. A., Komarov A. A. Mekhanizmy formirovaniya vzryvnykh nagruzok na territorii neftepererabatyvayushchikh kompleksov [The blast loads mechanism at oil refinery territories]. *Neft, gaz i biznes — Oil, Gas and Business*, 2002, no. 6, pp. 58–61.
3. Goldstein M. E. *Aeroakustika* [Aeroacoustics]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 294 p.
4. Khusnutdinov D. Z., Mishuev A. V., Kazennov V. V., Komarov A. A., Gromov N. V. *Avariynnye vzryvy gazovozdushnykh smesey v atmosfere* [Emergency explosions of the gas mixtures in atmosphere]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2014. 80 p.
5. Kazennov V. V. *Dinamicheskiye protsessy deflagratsionnogo goreniya vo vzryvoopasnykh zdaniyakh i pomeshcheniyakh: dis. d-ra tekhn. nauk* [Deflagration dynamic processes for explosive buildings and premises (doctoral thesis)]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1997. 445 p.
6. Komarov A. A. Raschet gazodinamicheskikh kharakteristik potokov pri avariynykh deflagratsionnykh vzryvakh na naruzhnykh ustanovkakh [Calculation of gas dynamics characteristics of flows during deflagrations at outdoor installations]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 5, pp. 15–18.
7. Abrosimov A. A., Komarov A. A. Meropriyatiya, obespechivayushchiye bezopasnyye nagruzki pri avariynykh vzryvakh v zdaniyakh so vzryvoopasnymi tekhnologiyami [Measures to ensure the safe blast loads in blast-hazardous premises]. *Seismologicheskoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy — Seismological Construction. Safety of Facilities*, 2001, no. 4, pp. 48–51.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Byakov A. V. The analysis of oil suppression by aqueous film forming foam through a gas-salt layer of water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1073–1076, pp. 2353–2357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.2353.
9. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1070–1072, pp. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
11. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms. *Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1997, pp. 800–808.

For citation: Komarov A. A., Kazennov V. V., Gusev A. A., Gromov N. V. Kriteriy kvazistatichnosti vzryvnogo davleniya gazoparovozdushnykh smesey v pomeshcheniyakh [Criterion for quasi-static conditions for confined blast pressure of a gas-air mixture in premises]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 56–61. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.56-61.