

Г. Г. ОРЛОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.841.123.2

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЗРЫВНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Показано, что при аварийных взрывах в объемах производственных помещений скорость распространения фронта пламени по газозвоздушной смеси (ГВС) может увеличиваться за счет присущего пламени явления гидродинамической неустойчивости, непрерывности движения воздуха и горючей смеси, наличия на пути пламени препятствий и пролетов в ограждающих конструкциях. Показано также, что интенсификация взрывного горения, проявляющаяся в ускорении распространения пламени, приводит к увеличению скорости нарастания давления и в итоге оказывает существенное влияние на выбор метода взрывозащиты сооружений от разрушений. Приведены уравнения для определения численных значений коэффициентов интенсификации с учетом вида ГВС, количества объектов, находящихся на пути распространения пламени, отношения их общей площади, перекрывающей свободный объем, к площади его поперечного сечения и расстояния между преградами. Представлены математические выражения, описывающие процесс сброса продуктов взрыва непосредственно в атмосферу, основанные на законах сохранения массы, объема и энергии для незамкнутой системы, с использованием барической и температурной зависимости нормальной скорости распространения пламени, а также уравнений истечения газа для дозвукового и звукового режимов.

Ключевые слова: степень интенсификации взрывного горения; скорость распространения пламени; газозвоздушная смесь; предохранительные конструкции; фронт пламени.

В производственных помещениях категории А по степени взрывопожароопасности при авариях технологического оборудования возможно образование горючих смесей, горение которых может протекать с различной скоростью, в том числе с ускорением. Для предотвращения разрушения зданий в этих условиях необходимо применять в наружных стенах зданий облегченные легкосбрасываемые конструкции. Легкосбрасываемые, или предохранительные, конструкции, вскрываясь под действием избыточного давления сгорающей смеси, обеспечивают сохранение здания.

Снижение избыточного давления зависит от ряда факторов: объема и формы помещения; вида горючей смеси, образующейся во взрывоопасном помещении в аварийных ситуациях, и степени загазованности помещения к моменту воспламенения; загроможденности взрывоопасного помещения строительными конструкциями (колоннами, строительными фермами и др.), технологическим оборудованием; общей площади и мест расположения в наружном ограждении взрывоопасного помещения проемов, перекрываемых предохранительными конструкциями. Эффективность вскрытия предохранительных конструкций зависит от их вида, геометри-

ческих и физических параметров, допускаемого избыточного давления и условий взрывного горения горючих смесей во взрывоопасном помещении.

При учете всех указанных факторов могут быть получены оптимальные решения по обеспечению взрывоустойчивости зданий при внутренних аварийных взрывах с помощью предохранительных конструкций, а также определены случаи, когда применение таких конструкций нецелесообразно. Игнорирование или даже неполный учет отдельных из указанных выше факторов может привести к негативным последствиям — разрушению зданий и сооружений со взрывоопасными помещениями.

При аварийных взрывах в объемах производственных помещений скорость распространения фронта пламени по газозвоздушной смеси (ГВС) может увеличиваться за счет присущего пламени явления гидродинамической неустойчивости, непрерывного движения воздуха и горючей смеси, наличия на пути пламени различных препятствий, а также проемов в ограждающих конструкциях. Интенсификация взрывного горения проявляется в ускорении распространения фронта пламени, что может привести к увеличению скорости нарастания давления.

При скоростях распространения пламени, превышающих локальную скорость звука, нагрузка на строительные конструкции определяется параметрами ударных и детонационных волн, что в свою очередь ведет к необходимости создания принципиально иных конструктивных решений по обеспечению взрывозащиты зданий и сооружений. Следовательно, скорость распространения пламени является одним из важнейших параметров взрывного горения, позволяющих оценить величину и характер нагрузок, действующих на строительные конструкции.

Замечено, что распространение пламени при объемном горении с постоянной скоростью составляет редкое исключение [1, 2]. В подавляющем большинстве случаев, особенно в производственных условиях, любые искривления фронта пламени, вызываемые движением еще не сгоревшей ГВС или наличием внешних возмущающих факторов, приводят к увеличению площади его поверхности. Это влечет за собой рост массовой скорости сгорания ГВС и ускорение распространения пламени. Наличие же подобных и подчас весьма эффективных внешних возмущающих факторов в объемах производственных помещений практически неизбежно. В объемах этих помещений, достигающих десятков и даже сотен тысяч кубических метров, начинает проявляться действие конвективных потоков еще не сгоревшей ГВС, что приводит к искривлению первоначальной формы пламени и тем самым к увеличению видимой скорости его распространения. В то же время открывающиеся в процессе горения проемы вызывают эффект “вытягивания” пламени, что еще более усиливает искривление его поверхности, вызванное действием свободной конвекции. Кроме того, в объемах зданий и сооружений со взрывоопасными производствами на формирование поверхности фронта пламени будет влиять наличие технологического оборудования, внутренних строительных конструкций (колонны и связи по ним, фермы, монтажные площадки и т. д.), вызывая турбулизацию пламени и тем самым приводя к дополнительной интенсификации взрывного горения. В связи с этим для определения величины и характера изменения нагрузки на ограждающие конструкции в процессе взрывного горения внутри производственных помещений необходимо правильно оценивать его фактическую степень интенсификации в каждом конкретном случае.

В результате анализа опыта использования основных моделей сброса давления установлено, что наиболее надежным количественным методом описания ускорения горения является моделирование, заключающееся в использовании после разгермети-

зации фактора турбулентности и его изменении с варьированием условий протекания взрыва.

Интенсификация взрывного горения как спокойной ГВС при отсутствии внешних возмущающих факторов, так и предварительно возмущенной ГВС определялась экспериментально [3, 4].

Установлено, что наиболее опасный сценарий протекания взрывного горения наблюдается тогда, когда источник воспламенения смеси находится у торцевой глухой стенки камеры, противоположной стенке с отверстием. В этом случае искривление и послойная турбулизация фронта пламени играют доминирующую роль в возникновении интенсификации взрывного горения. Для этих условий авторы исследований рассматривают следующую схему ускорения распространения пламени. После воспламенения полусферический фронт пламени вытягивается в направлении открытого проема, что, как уже отмечалось, ведет к незначительному росту скорости его распространения ($\alpha \cong 1 \div 2$). Поскольку плотность исходной ГВС приблизительно в 7 раз превышает плотность газообразных продуктов взрывного горения, то с момента перекрытия пламенем всей площади проема скорость истечения газов увеличивается приблизительно в 2–6 раз по сравнению со скоростью истечения исходной холодной ГВС. Столь резкое повышение скорости истечения газового потока через проем генерирует сильную турбулентность по поверхности пламени, что, в свою очередь, ведет к ускорению выделения тепловой энергии и, следовательно, к интенсификации взрывного горения (в некоторых опытах $\alpha > 10$).

Для теоретического описания математической модели ускорения распространения пламени была предложена зависимость между ускорением распространения пламени $du_{пл}/dt$ в результате вытягивания и турбулизации его поверхности и скоростью $u_{ис}$ истекающей через проем ГВС:

$$du_{пл}/dt \sim u_{ис},$$

где $u_{пл}$ — скорость распространения пламени.

Таким образом, в расчетной модели ускорения распространения пламени принимается, что это ускорение благодаря вытягиванию и турбулизации поверхности фронта пропорционально скорости истечения ГВС через проемы.

Проведенные опыты со всей очевидностью показывают, что наиболее интенсивное взрывное горение ГВС в свободных от препятствий удлиненных объемах (исключение, вероятно, составляют лишь объемы, близкие к кубической и сферической форме) имеет место при воспламенении смеси у закрытого торца, когда фронт пламени проходит максимально возможный путь, равный всей длине объема камеры (помещения).

Интенсификация взрывного горения в объемах с препятствиями устанавливалась в результате как лабораторных, так и натурных экспериментальных исследований, в которых имитировались аварийные взрывы ГВС. Эти исследования позволяют утверждать, что наличие разного рода препятствий на пути распространения пламени является основным фактором, влияющим на ускорение взрывного горения [5–7].

По результатам анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

Для больших объемов, заполненных газозвдушными смесями, в которых скорость распространения пламени превышает 100 м/с, уже нельзя пренебрегать такими газодинамическими эффектами в процессе взрывного горения, как сжимаемость газовой смеси, неравномерность распределения давления по объему (у закрытого торца, в середине и у открытого торца камеры), образование ударных волн. Результаты экспериментов, проводившихся в лабораторных установках с проемами в ограждении, совершенно непригодны для оценки давления, развивающегося в процессе взрывного горения больших объемов ГВС при наличии на пути пламени разного рода повторяющихся препятствий. Наличие последних ведет к возникновению и непрерывному усилению турбулизации горячей газозвдушной смеси, в результате чего увеличивается площадь поверхности пламени, что и является причиной ускорения его распространения. В этих условиях степень интенсификации взрывного горения ГВС достигала высоких значений, а в некоторых случаях скорость распространения пламени превышала скорость звука в горючей газовой смеси, и процесс взрывного горения приобретал качественно новый характер, когда впереди фронта пламени наблюдалось образование ударных волн [8, 9].

В зданиях со взрывоопасными производствами повторяющимися препятствиями являются колонны с установленными на них фермами и балками, а также установки технологических линий (насосы, компрессоры и т. п.). Например, в одноэтажном здании компрессорного отделения объемом 14600 м³ с наиболее часто встречающейся длиной 60 м и унифицированной габаритной схемой (пролет 18 м, высота до низа стропильной конструкции 10,8 м) при 6-метровом шаге колонн насчитывается девять таких препятствий. Отношение площади поверхности препятствий в сечении ко всей площади поперечного сечения не превышает 0,2, в то время как во взрывной камере, наиболее близко имитирующей подобную производственную обстановку, этот коэффициент составляет 0,3. Поэтому в этих зданиях следует ожидать значительно меньшую интенсифи-

кацию взрывного горения при общей схожести характера процесса его развития.

Принципиально иная картина процесса взрывного горения ГВС наблюдается в здании с отдельным стоящим препятствием, наличие которого на пути пламени ведет лишь к искривлению его поверхности (без турбулизации) и кратковременному периоду локального повышения скорости распространения пламени. После этого вызванные наличием препятствия искривления поверхности пламени сглаживаются, а скорость распространения вновь снижается до значения, характерного для горения в свободном от препятствий объеме. Так, в проведенных опытах максимальная степень локальной интенсификации взрывного горения ГВС равнялась 22, а усредненная за время полного сгорания ГВС $\alpha_{\text{ср}} \cong 3$.

Наименьшая интенсификация взрывного горения ГВС должна иметь место в относительно небольших производственных помещениях, близких по форме к кубу, с минимальным заполнением объема препятствиями. Подтверждением этому предположению служат результаты опытов, проводившихся в свободных от препятствий объемах 70 и 2000 м³, в которых значение α в результате потери пламенем устойчивости не превышало 2.

При определении взрывных нагрузок необходимо учитывать интенсификацию горения, которая зависит и от формы объема помещения. Наличие ограждающих конструкций в объеме кубической формы точно так же, как и шаровой, не оказывает заметного влияния на интенсификацию взрывного горения ГВС. В вытянутых же объемах характер горения ГВС может приближаться к режиму горения в каналах, и в процессе взаимодействия фронта пламени с ограждающими конструкциями возможна интенсификация горения.

По данным ряда работ [10, 11] можно установить, что значения α изменяются в зависимости от соотношения размеров объема кубической формы следующим образом (табл. 1).

Учитывая, что вскрытие ЛСК происходит прежде, чем фронт пламени достигнет ограждений, влияние стенок на интенсификацию горения можно не учи-

Таблица 1. Значения α при различном соотношении размеров объема кубической формы

Соотношение размеров	Значение α
$a = b = l$	1,0
$a = b; l = 10b = R$	3,5
$a = b; l = 20b = R$	12
$l = 25R$	20
Примечание. R — расстояние от места зажигания ГВС до наиболее удаленной точки ограждающей конструкции.	

тывать, так как наличие преград на пути распространения пламени оказывает решающее влияние на интенсификацию горения.

Опыты показали, что интенсификация горения ГВС зависит и от размеров препятствий (преград), и от их взаимного расположения по отношению к направлению перемещения фронта пламени.

Опыты также показали, что резкая интенсификация горения происходит при столкновении с первыми рядами препятствий, а последующие лишь поддерживают ее на достигнутом уровне.

Приведенные результаты экспериментальных исследований по оценке интенсификации взрывного горения ГВС позволяют сделать заключение, что наибольший эффект ускорения распространения фронта пламени имеет место при прохождении его через преграды, находящиеся на пути его распространения. При этом замечено, что основное влияние на интенсификацию горения оказывает как количество преград, так и их площадь, перекрывающая поперечное сечение объема, заполненного ГВС, причем степень заполнения объема различными объектами имеет решающее значение. На определенном этапе взрывного горения с уменьшением площади пламени, приходящейся на единицу площади поверхности преград, наблюдается снижение скорости горения, и при достижении так называемого тушащего диаметра происходит ее полное гашение [7].

При однотипных (одинаковых) преградах, расположенных в ряд перпендикулярно к направлению распространения фронта пламени, коэффициент интенсификации взрывного горения ГВС $\alpha_{\max}$ может

определяться по формуле, полученной на основании анализа данных экспериментальных исследований, которые были аппроксимированы с использованием вычислительной техники:

$$\alpha_{\max} = 2 + (u_n / 0,5) \xi [(0,578 + 0,152n + 0,001n^2) + (5,719 + 0,689n + 0,012n^2)f + (-6,339 - 0,618n - 0,015n^2)n^2], \quad (1)$$

где u_n — нормальная скорость горения, м/с;

n — количество однотипных преград; $n \geq 1$;

ξ — коэффициент, учитывающий расстояние между преградами L (табл. 2);

f — отношение площади преграды к поперечному сечению помещения.

Согласно данным опытов [3] при взрывном горении пропановоздушной смеси стехиометрической концентрации в цилиндрической камере объемом 11 м^3 при $f = 0,07$ и при установке трех однотипных преград через $0,2 \text{ м}$ коэффициент интенсификации $\alpha_{\max} = 16$. Используя те же данные и подставляя их в формулу (1), с учетом $\xi = 6,5$ получаем $\alpha_{\max} = 14,95$. В той же опытной камере при аналогичных условиях, но при $f = 0,32$ значение $\alpha_{\max}$ составляет 24, а по формуле (1) — 22,95.

При взрывном горении метановоздушной смеси стехиометрической концентрации в камере объемом 50 м^3 при $f = 0,3$ и с четырьмя однотипными преградами, расположенными через $0,3 \text{ м}$, $\alpha_{\max} = 65$. При этих же исходных данных при расчете по формуле (1) $\alpha_{\max} = 64,43$. Значения $\alpha_{\max}$, полученные с помощью зависимости (1), довольно близки к опытным данным.

Таблица 2. Значения коэффициента ξ

$L, \text{ м}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
ξ	1,0	4,0	6,5	17,0	11,5	9,0	5,5	2,5	2,0	1,2	1,0

Примечание. Промежуточные значения ξ могут быть определены путем интерполяции.

Таблица 3. Значения коэффициента интенсификации α в зависимости от количества преград n , находящихся на пути распространения пламени, и отношения f для горючих газов с $u_n = 0,5 \text{ м/с}$, $\xi = 1$

f	Значение α при количестве преград n													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,05	1,87	2,05	2,23	2,40	2,57	2,75	2,93	3,17	3,40	3,48	3,56	3,75	3,94	4,04
0,1	2,14	2,36	2,57	2,78	2,99	3,19	3,39	3,67	3,95	4,06	4,17	4,40	4,64	4,80
0,2	2,71	2,91	3,11	3,37	3,63	3,90	4,16	4,50	4,83	5,00	5,17	5,49	5,81	6,00
0,3	2,89	3,19	3,48	3,79	4,09	4,40	4,71	5,09	5,47	5,68	5,88	6,26	6,64	6,86
0,4	3,02	3,36	3,69	4,02	4,35	4,69	5,03	5,43	5,82	6,05	6,27	6,70	7,13	7,44
0,5	3,05	3,39	3,73	4,07	4,41	4,76	5,10	5,52	5,94	6,16	6,38	6,82	7,26	7,58
0,6	2,92	3,26	3,60	3,94	4,27	4,68	4,97	5,38	5,79	5,98	6,17	6,62	7,07	7,18

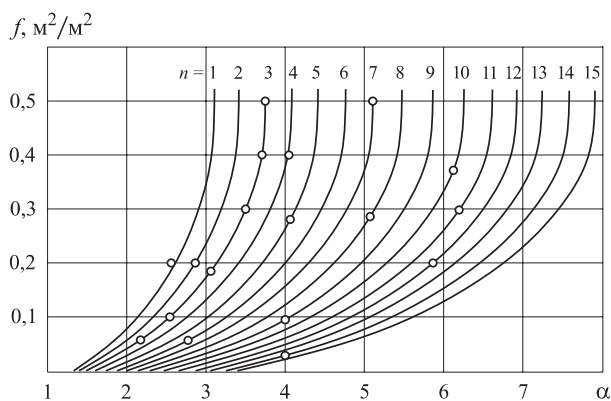
Примечание. $f = F_{\text{пр}} / F_n$, где $F_{\text{пр}}$ — проекция площади преграды перед фронтом пламени; F_n — площадь поперечного сечения объема опытной установки.

В табл. 3 приведены значения коэффициента интенсификации α , полученные по формуле (1) при условии, что расстояние между однотипными преградами $L_{\max} = 2,4$ м, т. е. когда предыдущая преграда еще может оказывать незначительное влияние на изменение α .

В связи с этим выражение (1) позволяет устанавливать численные значения коэффициентов интенсификации $\alpha_{\max}$ с учетом вида ГВС, количества объектов, находящихся на пути распространения пламени, отношения их общей площади, перекрывающей свободный объем, к площади его поперечного сечения, рассматриваемого нормально к направлению перемещения фронта пламени, и расстояния между преградами (объектами). На рисунке приведены графики, построенные по полученной зависимости, с нанесением на них для сравнения экспериментальных точек $\alpha_{\max}$.

При наличии опытных данных, полученных экспериментально применительно к конкретным условиям тех или иных взрывоопасных производств, значения $\alpha_{\max}$ целесообразно принимать в соответствии с этими данными.

Сформулирована математическая модель, описывающая процесс сброса продуктов взрыва непо-



Сравнение значений коэффициента интенсификации α , полученных для горючих смесей с $u_n = 0,5$ м/с по уравнению (1), с опытными данными

средственно в атмосферу, основанная на законах сохранения массы, объема и энергии для незамкнутой системы, с использованием барической и температурной зависимости нормальной скорости распространения пламени, а также уравнений истечения газа для дозвукового и звукового режимов. Для использования инерционных сбросных элементов в эту модель необходимо включать уравнения поступательного или вращательного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1957.
- Щелкин К. И. Неустойчивость горения и детонации газов // Успехи физических наук. — 1965. — Т. 87, вып. 2. — С. 273–302. doi: 10.3367/UFNr.0087.196510d.0273.
- Harris G. F. P., Briscoe P. G. The venting of pentane vapour-air explosions on a large vessel // Combustion and Flame. — 1967. — Vol. 11, Issue 4. — P. 329–338. doi: 10.1016/0010-2180(67)90022-3.
- Hawkins N. M. Seismic resistance of prestressed and precast. Concrete structures // PCI Journal. — 1978. — Vol. 23, Issue 1. — P. 40–58. doi: 10.15554/pcij.01011978.40.58.
- Chan C., Moen I. O., Lee J. H. S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles // Combustion and Flame. — 1983. — Vol. 49, Issue 1–3. — P. 27–39. doi: 10.1016/0010-2180(83)90148-7.
- Dörge K. J., Pangritz D., Wagner H. G. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids // Acta Astroautica. — 1976. — Vol. 3, Issue 11–12. — P. 1067–1076. doi: 10.1016/0094-5765(76)90013-8.
- Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // Combustion and Flame. — 1980. — Vol. 39, Issue 1. — P. 21–32. doi: 10.1016/0010-2180(80)90003-6.
- Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. Flame propagation in the presence of repeated obstacles: Influence of gas reactivity and degree of confinement // Journal of Hazardous Materials. — 1983. — Vol. 8, Issue 2. — P. 139–156. doi: 10.1016/0304-3894(83)80053-3.
- Мосашвили З. Т. Экспериментальные исследования процессов взрывного горения в топках котлов // Сообщения АН Грузинской ССР. — 1987. — Т. 90, № 1. — С. 21–24.
- Hjertager B. H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows // Comb. Sci. Technology. — 1982. — Vol. 27, Issue 5–6. — P. 159–170. doi: 10.1080/00102208208946985.
- Агафонов В. В. О проблеме взрывозащиты промышленных печей и сушилок // Тезисы II Всесоюзной научной конференции МИСИС. — М.: МИСИС, 1983. — С. 81.

Материал поступил в редакцию 20 февраля 2015 г.

ASSESSMENT OF INTENSIFICATION DEGREE OF EXPLOSIVE COMBUSTION OF A GAS-AIR MIXTURE

ORLOV G. G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

It is shown that in case of accidental explosions inside volumes of production area the propagation rate of flame front on a gas-air mixture (GAM) can increase due to the flame inherent phenomena of hydrodynamic instability, continuous movement of air and combustible mixture, presence of obstacles on the way of flame and bays flights in cladding structures. It is also shown that intensification of explosive combustion which appear in acceleration of flame propagation which result in increase of pressure rise rate and as a result has material effect on a choice of method of explosion protection of constructions from destruction. Equations determining the numerical values of intensification coefficients taking into account the type of GAM, number of objects on the way of flame propagation, ratio of their total area blocking free volume to the area of its cross section and distance between obstacles are given. The mathematical expressions describing process of discharge of explosion products directly into atmosphere based on law of conservation of mass, volume and energy for open system using baric and temperature dependence of normal speed of flame propagation, and also equations of gas efflux for subsonic and sonic modes are presented.

Keywords: intensification degree of explosive combustion; propagation rate of flame; gas-air mixture; pressure-relief valves; flame front.

REFERENCES

1. Khitrin L. N. *Fizika gorennya i vzryva* [Physics of burning and explosion]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 1957.
2. Shchelkin K. I. Neustoychivost gorennya i detonatsii gazov [Instability of combustion and detonation of gases]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1965, vol. 87, issue 2, pp. 273–302. doi: 10.3367/UFNr.0087.196510d.0273.
3. Harris G. F. P., Briscoe P. G. The venting of pentane vapour-air explosions on a large vessel. *Combustion and Flame*, 1967, vol. 11, issue 4, pp. 329–338. doi: 10.1016/0010-2180(67)90022-3.
4. Hawkins N. M. Seismic resistance of prestressed and precast. Concrete structures. *PCI Journal*, 1978, vol. 23, issue 1, pp. 40–58. doi: 10.15554/pci.01011978.40.58.
5. Chan C., Moen I. O., Lee J. H. S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles. *Combustion and Flame*, 1983, vol. 49, issue 1–3, pp. 27–39. doi: 10.1016/0010-2180(83)90148-7.
6. Dörge K. J., Pangritz D., Wagner H. G. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids. *Acta Astroautica*, 1976, vol. 3, issue 11–12, pp. 1067–1076. doi: 10.1016/0094-5765(76)90013-8.
7. Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles. *Combustion and Flame*, 1980, vol. 39, issue 1, pp. 21–32. doi: 10.1016/0010-2180(80)90003-6.
8. Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. Flame propagation in the presence of repeated obstacles: Influence of gas reactivity and degree of confinement. *Journal of Hazardous Materials*, 1983, vol. 8, issue 2, pp. 139–156. doi: 10.1016/0304-3894(83)80053-3.
9. Mosashvili Z. T. Eksperimentalnyye issledovaniya protsessov vzryvnogo gorennya v topkakh kotlov [Experimental studies of processes of explosive burning in a boiler furnaces]. *Soobshcheniya AN Gruzinskoy SSR — Communications of Georgian National Academy of Sciences*, 1987, vol. 90, no. 1.
10. Hjertager B. H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows. *Comb. Sci. Technology*, 1982, vol. 27, issue 5–6, pp. 159–170. doi: 10.1080/00102208208946985.
11. Agafonov V. V. et al. O probleme vzryvozashchity promyshlennykh pechey i sushil [On a problem of explosion protection of industrial furnaces and dryers]. *Tezisy II Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii MISiS* [Abstracts of II All-Union Scientific Conference of Moscow Institute for Steel and Alloys]. Moscow, Moscow Institute for Steel and Alloys Publ., 1983, p. 81.