

УДК 662.311

*М.Ф. Буллер^а, В.А. Роботко^б***ДЛИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА БАЛЛИСТИТНЫЕ СОСТАВЫ**^а Шосткинский институт Сумского государственного университета^б Государственный научно-исследовательский институт химических продуктов, г. Шостка

Изучено длительное воздействие (более трех лет) воды в жидком и парообразном состоянии на основные свойства баллиститных топлив. Установлено, что в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха и исходного содержания влаги в топливе в процессе выдержки в начальные 200 суток происходит либо быстрый набор, либо потеря массы за счет миграции влаги. Впоследствии (более 200 суток) наблюдается постоянное падение массы образцов, причиной которого является удаление из топлива летучих компонентов (жидкие пластификаторы). По полученным экспериментальным данным рассчитаны коэффициенты диффузии влаги и летучих компонентов топлив. Коэффициенты диффузии летучих компонентов не зависят от влажности окружающего воздуха. Проанализировано влияние атмосферной влаги в процессе выдержки на теплоту сгорания и плотность баллиститных топлив. В работе исследован процесс миграции компонентов баллиститных составов в окружающую водную среду в течение длительного времени (более двух лет). На основании проведенных исследований рассчитаны коэффициенты диффузии нитроглицерина, динитротолуола и централита-II в воду. Миграция компонентов в воду происходит из тонкого внешнего слоя порохового элемента и определяется низкой растворимостью компонентов баллиститных топлив.

Ключевые слова: баллиститное топливо, диффузия, влага, теплота сгорания, плотность.

DOI: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-109-115

Введение

Известно, что баллиститные составы, получаемые при утилизации боеприпасов, могут использоваться в производстве промышленных взрывчатых веществ. Их подготовка связана с процессом измельчения баллиститных трубок и шашек в более мелкие элементы (до 5 мм), причем, при измельчении используется вода в качестве вещества понижающего чувствительность баллиститных порохов и топлив к механическим нагрузкам, возникающих на ножах измельчителя. Измельчение в водной среде способствует миграции компонентов трубок и шашек с большей интенсивностью, чем миграция компонентов из этих трубок и шашек в водную среду без измельчения.

Экологические нормы при проектировании химических технологий, прежде всего, требуют наличия многократного оборота и сброса технологической воды соответствующей чистоты.

Технологический процесс получения промышленного взрывчатого вещества «Бипор», содержащего смесь пироксилинового и баллиститного порохов, спроектирован таким образом, что вода, участвующая в измельчении, постоянно поступает на очистку. Первой стадией этой очистки является улов мельчайших частиц, образовавшихся при измельчении трубок и шашек. Вторая стадия очистки – извлечение из воды водорастворимых веществ баллиститных составов с использованием твердых сорбентов. Очищенная вода вновь поступает на стадию измельчения порохов.

Важными моментами при контроле производства промышленных взрывчатых веществ на основе утилизируемых баллиститных и пироксилиновых порохов являются содержание водорастворимых компонентов в технологической воде и контроль качества сорбента (текущая сорбционная емкость). До сих пор таких данных в ли-

температуре нет.

Важным вопросом при утилизации и повторном применении по прямому назначению баллиститных порохов и топлив является влияние паров воды, содержащихся в воздухе, на сохранность химического состава и физической стабильности [1]. При этом, отрицательным явлением для баллиститных топлив есть миграция влаги внутрь пороховых элементов из атмосферного воздуха при разгерметизации боеприпасов или хранении их в негерметичной таре. Баллиститные составы, в отличие от пироксилиновых порохов и смесевых твердых ракетных топлив, обладают относительно низкой способностью поглощать влагу из воздуха [2]. Это объясняется наличием в них труднолетучих и нелетучих пластификаторов (динитротолуол, дибутилфталат), которые имеют низкую смачиваемость водой. Также они блокируют гидроксильные группы нитратов целлюлозы, которые являются центрами сорбции влаги.

Влага оказывает пластифицирующее действие на нитраты целлюлозы и ведет к снижению прочностных свойств, а также снижает температуру механического стеклования топлива, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках баллиститных составов. Кроме того, наличие влаги увеличивает скорость химического разложения нитратов целлюлозы и многоатомных спиртов [3].

Экспериментальная часть

Для исследования процесса миграции были отобраны образцы баллиститного топлива марки Н, в состав которого входят следующие основные компоненты: коллоксилин – 57%, нитроглицерин – 28%, динитротолуол – 11%, N,N'-диметил-N,N'-дифенилкарбамид (централит II) – 3% и другие добавки в незначительных количествах.

Образцы топлива марки Н вырезали из утилизированных шашек в виде полых цилиндров (наличие каналов) двух видов. Основные характеристики подготовленных образцов представлены в табл. 1.

Исследование процесса миграции органических компонентов из баллиститного топлива в водную среду проводили с помощью специальной ячейки (рис. 1). Образцы баллиститного топлива типа 1 (рис. 1, поз. 1) массой около 12,3 г каждый помещали в стеклянный стаканчик ячеек (рис. 1, поз. 3), заливали дистиллированной водой в объеме 18 мл (рис. 1, поз. 2). Было приготовлено 5 таких ячеек с образцами. Ячейку герметично закрывали металлической

Таблица 1

Основные характеристики исходных образцов

Параметр	Тип 1	Тип 2
Внешний диаметр, мм	17,4	39,5
Внутренний диаметр, мм	7,1	8,0
Длина, мм	40,0	30,0
Объем, см ³	7,924	35,237
Площадь поверхности, см ²	34,734	68,236
Исходная масса, г	12,3	59,2
Исходная плотность, г/см ³	1,579	1,680*
Исходная влажность, % масс.	0,34	0,38
Удельная площадь поверхности, см ² /г	2,824	1,153

Примечание: * – плотность рассчитана на основе геометрии и массы образца.

крышкой с зажимом (рис. 1, поз. 4–6) и выдерживали в течение 25,5 месяцев. Через планируемый промежуток времени вскрывали ячейку и анализировали воду.

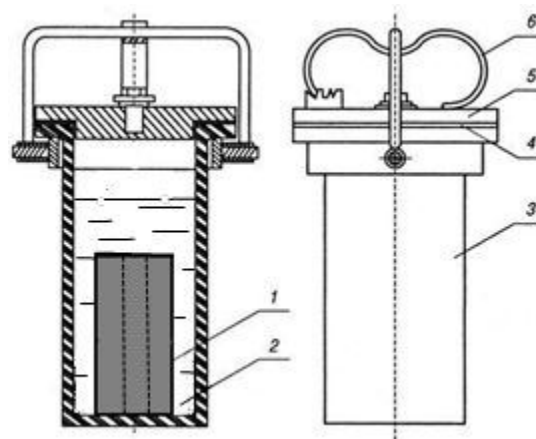


Рис. 1. Ячейка для исследования миграции с затвором из нержавеющей стали: 1 – образец топлива; 2 – жидкая среда; 3 – стеклянный стаканчик; 4 – резиновая прокладка; 5 – стальная крышка; 6 – стальная пружина

Отобранную после выдержки воду переносили в делительную воронку, добавляли раствор внутреннего стандарта в метилхлориде, экстрагировали в течение суток и анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Химический состав самого топлива изучали также методом жидкостной хроматографии.

Для изучения процесса сорбции паров влаги из воздуха образцы (тип 1 и тип 2) помещали в

эксикаторы с заданной относительной влажностью 0; 65 и 95%, температура выдержки образцов составляла $20 \pm 2^\circ\text{C}$. В каждый эксикатор помещали два образца типа 1 и один образец типа 2 и контролировали массу образцов в течение 40 месяцев. Массу образцов контролировали один раз в двое суток (до 450 сут) и один раз в пять суток (после 450 сут).

Для определения теплоты сгорания и содержания органических компонентов в исследуемых образцах готовили различные слои пороховых элементов. Внешние слои и торцы образцов снимали на настольном токарном станке, внутренние слои – путем рассверливания канала сверлами соответствующего диаметра. Толщину снятия слоев контролировали на измерительном микроскопе ММИ-2 (погрешность измерения $\pm 0,003$ мм).

Теплоту сгорания образцов топлив определяли на бомбовом калориметре ИКА С2000 в атмосфере инертного газа (азота). Плотность образцов до и после выдержки определяли методом гидростатического взвешивания в бензине. Содержание воды в образцах определяли гравиметрическим методом – сушка образцов при температуре $50 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 6 ч.

Результаты и их обсуждение

Кинетика поглощения паров воды исследовалась при относительных влажностях воздуха 0; 65 и 95%. Предполагалось, что при относительной влажности 0% в эксикаторе идет процесс удаления из образцов воды и летучих веществ (жидкие пластификаторы [4] и продукты разложения нитроэфиров [5]). При относительной влажности 65% (равновесная влажность) допустимо увлажнение (или сушка) образцов до равновесной влажности и удаление летучих веществ. При относительной влажности 95% вероятнее происходит увлажнение образцов и удаление летучих веществ.

Кривые потери массы в различной по влажности атмосфере (рис. 2) можно условно разделить на два участка: первый участок – период от начала выдержки до порядка 200 суток и второй участок – период от 200 до 1210 суток.

Анализ полученных результатов при длительной выдержке образцов более 3 лет в эксикаторах (рис. 2), показывает следующее. При выдержке образцов при 0% и 65% относительной влажности наблюдается постоянное во времени уменьшение массы (кривые 1, 2). При относительной влажности 95% на первом участке кривой происходит увлажнение образцов (кривая 3). В дальнейшем (после порядка 110–124 суток) начинается процесс постоянной потери массы образцов, как при 0%, так и при 65% влажности. Прирост массы (очевидно за счет поглощения воды) для образцов типа 2 составил в среднем 0,15% к 124 суткам выдержки в эксикаторе. Для образцов типа 1 этот прирост составил в среднем 0,28% к 110 суткам выдержки.

На втором участке кривой выдержки до 1210 суток уменьшение массы к концу этого периода практически при 95% влажности становится соизмеримым с падением массы для образцов, выдержанных при 65% влажности: для образцов типа 2 – 0,70% против 0,76% и образцов типа 1 – 1,02% против 1,04% относительно исходной массы.

Общее падение массы образцов типа 2 и образцов типа 1 при 0% относительной влажности составило соответственно 1,58 и 1,77%. Неизмеримость этих цифр связана с различной структурой и геометрией – удельная поверхность образцов типа 1 больше, чем у образцов типа 2 (табл. 1). Скорость потери массы на втором участке выдержки для образцов типа 2 составила 0,0006%/сут при 0% относительной влажности, 0,0003%/сут при 65% относительной влажности, 0,0007%/сут при 95% относительной влаж-

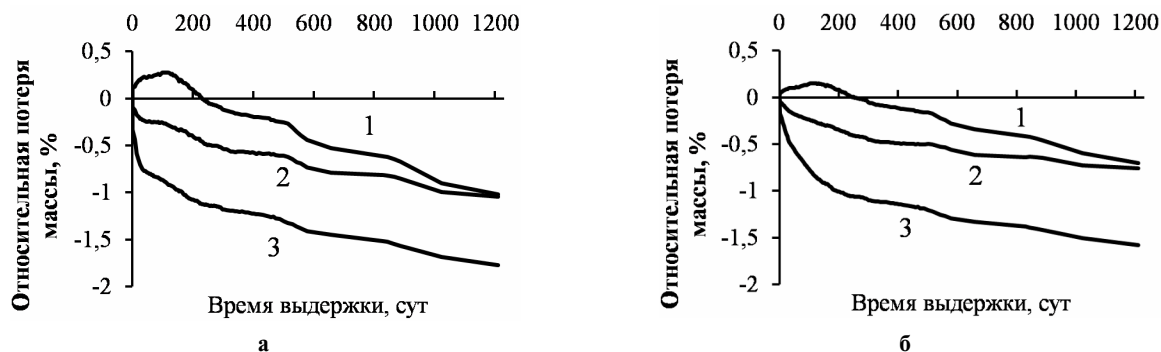


Рис. 2. Кривые изменения массы топлив во времени для образцов типа 1 (а) и типа 2 (б) при различных относительных влажностях воздуха: 1 – 95%; 2 – 65%; 3 – 0%

ности. Для образцов типа 1 скорость потери массы на втором участке выдержки составила 0,0007%/сут при 0% относительной влажности, 0,0006%/сут при 65% относительной влажности и 0,0010%/сут при 95% относительной влажности.

Для образцов типа 2 после выдержки в течение 1210 суток определяли содержание влаги. Среднее содержание влаги у образцов, выдержанных при относительной влажности воздуха 0%, составляет 0,41%, а в поверхностном слое толщиной 0,5 мм – 0,07%. Среднее содержание влаги у образцов, выдержанных при влажности воздуха 95%, составляет 0,46%, а в поверхностном слое толщиной 0,5 мм – 1,15%, что близко по значению к равновесному содержанию влаги в баллиститных составах при данной влажности окружающего воздуха [2]. Полученные результаты подтверждают, что на первом участке происходит преимущественно испарение или поглощение (в зависимости от влажности воздуха) влаги из тонкого поверхностного слоя образцов, а на втором участке этот процесс сильно замедляется за счет низкой скорости диффузии влаги из внутренних слоев порохового элемента и преимущественно идет процесс удаления летучих веществ.

Для каждого типа образцов и относительной влажности воздуха рассчитывали коэффициенты диффузии D паров воды по формулам [6]:

– для первого этапа сушки $\left(\frac{m_\tau}{m_\infty} < 0,5\right)$:

$$D_I = (\operatorname{tg}\alpha)_I^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2;$$

– для второго этапа сушки $\left(\frac{m_\tau}{m_\infty} > 0,5\right)$:

$$D_{II} = (\operatorname{tg}\alpha)_{II} \cdot \frac{1}{\pi^2} \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2,$$

где m_t – масса образца к моменту времени t ; m_∞ – конечная масса образца; S – внешняя поверхность образца; V – объем образца.

При этом значение $(\operatorname{tg}\alpha)_I$ определяли по углу наклона прямой линии, построенной в координатах

$\frac{m_\tau}{m_\infty} = f(\sqrt{\tau})$, а значение $(\operatorname{tg}\alpha)_{II}$ – по углу наклона прямой линии, построенной в координатах

$$\ln\left(1 - \frac{m_\tau}{m_\infty}\right) = f(\tau).$$

Полученные коэффициенты диффузии для различных образцов, выдержанных в условиях разной влажности, представлены в табл. 2.

Для образцов, которые выдерживались при относительной влажности воздуха 95%, коэффициенты диффузии для второго этапа набора массы не рассчитывались, поскольку полученные данные искажались одновременной потерей массы за счет удаления летучих веществ.

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что на первом участке (до 200 суток) происходит преимущественно процесс удаления влаги для образцов, выдерживаемых при относительной влажности 0 и 65% (рис. 2, кривые 2, 3) и увлажнения при влажности 95% (рис. 2, кривые 1).

Коэффициенты диффузии для второго этапа потери массы для образцов одного типа практически не зависят от относительной влажности окружающего воздуха. Это объясняется тем, что на втором участке (после 200 суток) процесс диффузии влаги практически прекращается и происходит преимущественно удаление из пороха летучих веществ.

Важно знать, насколько длительное воздействие паров воды влияет на основные характеристики баллиститных топлив. Поэтому для исследуемых образцов определяли теплоту сго-

Таблица 2

Коэффициенты диффузии паров воды в различных условиях

Образец	Влажность, %	Характер изменения массы образца (рис. 2)	Коэффициент диффузии $D \cdot 10^9$, $\text{см}^2/\text{с}$	
			Первый этап сушки	Второй этап сушки
Тип 1	0	потеря	3,135	0,105
Тип 2		потеря	5,937	0,521
Тип 1	65	потеря	0,372	0,095
Тип 2		потеря	2,466	0,492
Тип 1	95	набор	13,098	–
Тип 2		потеря	0,204	0,109
		набор	40,757	–
		потеря	0,742	0,588

рания и плотность пороховых элементов (наиболее важные, на наш взгляд, характеристики). Данные по изменению теплоты сгорания после выдержки при различной влажности представлены в табл. 3. Для анализа снимали слои толщиной для образца типа 1: торец – 1,5 мм; внешняя и внутренняя поверхности – 1,45 и 0,45 мм² соответственно; внутренний слой – остаток после снятия слоев торца, внешней и внутренней поверхностей. Для образцов типа 2: торец – 1,5 мм; внутренняя поверхность получалась при высверливании сверлом диаметром 6,0 мм на расстоянии 7,9 мм от внешней поверхности образца (середина толщины горящего свода).

Анализ результатов, представленных в табл. 3, показывает, что теплоты сгорания образцов типа 1 и 2, выдержанных при влажностях воздуха 0 и 65%, не изменяются по слоям пороховой трубки и близки по значениям к исходной теплоте сгорания. При влажности 95% теплота сгорания

ниже исходной, что особенно заметно у образца, взятого с торца толщиной 1,5 мм. Это связано с более высоким содержанием влаги и меньшим содержанием нитроглицерина (за счет удаления) в поверхностном слое.

Исследования влияния выдержки образцов типа 1 при различных относительных влажностях воздуха показали, что плотность анализируемых образцов, определенная гидростатическим методом, практически не изменяется и составляет 1,569–1,580 г/см³ при плотности исходного образца 1,579 г/см³, что косвенно указывает на неизменность структуры пороховых элементов.

Результаты по миграции компонентов баллиститного топлива в водную среду представлены в табл. 4. Рассчитанные коэффициенты диффузии и растворимость компонентов баллиститных топлив представлены в табл. 5. Полученные данные дадут возможность подобрать адсорбент по очистке технологической воды в

Таблица 3

Теплота сгорания исследуемых образцов по слоям

Влажность, %	Слой образца	Теплота сгорания, кДж/кг	
		Образец типа 1	Образец типа 2
0	Торец	3692,8	3663,5
	Внешняя и внутренняя поверхности	3713,7	–
	Внутренний слой	3705,3	3663,5
65	Торец	3663,5	–
	Внешняя и внутренняя поверхности	3701,1	–
	Внутренний слой	3713,7	–
95	Торец	3546,2	3634,1
	Внешняя и внутренняя поверхности	3663,5	–
	Внутренний слой	3676,0	3650,9
– (исходное топливо)	Среднее значение	3722,1	3667,6

Таблица 4

Кинетические параметры процесса миграции компонентов баллиститного топлива (образец тип 1)

Время выдержки образца, месяц	Содержание компонента в воде, г			Общее содержание компонентов	
	Нитроглицерин	Динитротолуол	Централит-II	г	% от исходной массы топлива
1	0,0197	0,0014	0,00040	0,0216	0,17
2	0,0223	0,0018	0,00043	0,0244	0,20
4	0,0244	0,0021	0,00043	0,0269	0,21
7	0,0250	0,0020	0,00048	0,0274	0,22
25,5	0,0233	0,0019	0,00050	0,0257	0,21

Таблица 5

Коэффициенты диффузии и растворимость компонентов баллиститных топлив (образец тип 1)

Параметр	Нитроглицерин	Динитротолуол	Централит-II
Коэффициент диффузии, см ² /с	9,83·10 ⁻⁹	8,21·10 ⁻⁹	1,41·10 ⁻⁸
Растворимость компонента в 18 мл воды, г	0,0248	0,0033	0,00083

процессе получения промышленных взрывчатых веществ на основе утилизируемых баллиститных составов.

Кинетика удаления компонентов для исследуемых образцов имеет одноподобный характер. Если результаты представить в координатах $\frac{m_t}{m_\infty} - \sqrt{\tau}$, то получается график с двумя прямолинейными участками (рис. 3). Первый участок связан, по-видимому, с быстрой миграцией компонентов топлива с внешней поверхности порохового элемента (рис. 3, прямая 1). Далее скорость миграции компонентов снижается (рис. 3, прямая 2). Это снижение связано, вероятно, с миграцией компонентов из внутренних слоев порохового элемента на внешний слой с дальнейшей миграцией их в воду.

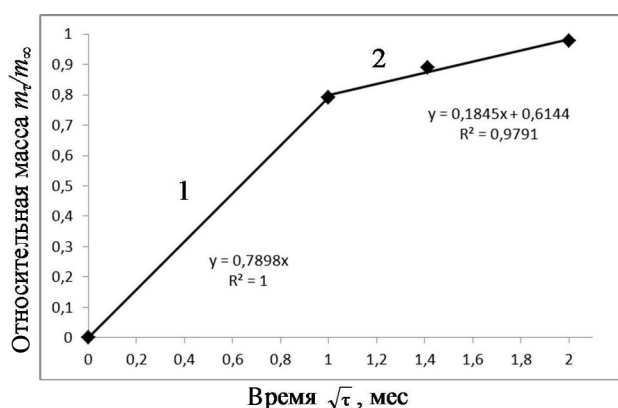


Рис. 3. Кинетика миграции нитроглицерина из образцов в

$$\text{координатах } \frac{m_t}{m_\infty} - \sqrt{\tau}$$

Образцы баллиститных топлив после выдержки в воде были проанализированы на содержание основных органических компонентов — нитроглицерин, динитротолуол, централит-II. Для этого образцы, извлеченные из воды сушили в течение одного месяца на воздухе, а затем подвергали анализу методом жидкостной хро-

матографии. Результаты по изменению среднего содержания нитроглицерина и его содержания на внешних и внутренних поверхностях образцов за первые два месяца выдержки в воде представлены в табл. 6. Изменения содержания динитротолуола и централита-II находятся в пределах погрешности анализа.

Выводы

Исследован процесс сорбции/десорбции паров воды из образцов баллиститных топлив марки Н в течение длительного времени (1210 суток) в условиях различной относительной влажности воздуха и получены коэффициенты диффузии миграции влаги и летучих компонентов баллиститных топлив. Показано влияние процессов сорбции/десорбции паров воды на некоторые характеристики баллиститных топлив (теплота сгорания, плотность пороховых элементов). Полученные данные могут быть использованы при изучении процессов физического старения баллиститных составов.

Исследован процесс миграции компонентов баллиститных составов (нитроглицерина, динитродолуола, централита-II) в водную среду и рассчитаны коэффициенты диффузии основных органических компонентов в условиях проведения эксперимента. Данные величины могут быть использованы для обоснования технологических параметров очистки технологической воды при утилизации баллиститных составов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on the influence of moisture content on thermal stability of propellant / Guo S., Wang Q., Sun J., Liao X., Wang Z.-S. // *J. Hazard. Mater.* — 2009. — Vol.168. — P.536-541.
2. Зеленский В.П. Эксплуатационные свойства порохов и зарядов. — Пенза, 1975. — 358 с.
3. Межевич Г.В., Буллер М.Ф., Роботко В.А. Склад похідних дифеніламіну і тривалість зберігання піроксилінових порохів // *Вопр. химии и хим. технологии.* — 2017. — № 4. — С.63-70.
4. Suceska M., Musanic S.M., Houra I.F. Kinetics and

Таблица 6

Изменение содержания нитроглицерина по слоям образца типа 1

Время выдержки образца, мес	Содержание нитроглицерина, мас.%		
	Среднее	Внутренняя поверхность*	Внешняя поверхность**
0	28,35	28,8	28,63
1	28,12	28,75	26,85
2	27,95	27,81	26,91

Примечание: * — толщина слоя 0,2 мм; ** — толщина слоя 1,3 мм.

enthalpy of nitroglycerin evaporation from double base propellants by isothermal thermogravimetry // *Thermochim. Acta.* – 2010. – Vol.510. – P.9-16.

5. Analysis of the aging process of double-base propellants without an organic stabilizer / Jelisavac L., Bobic N., Stojiljkovic S., Dimic M., Brzic S., Terzic S. // *Sci. Techn. Rev.* – 2014. – Vol.64. – No. 3. – P.3-9.

6. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. – М.: Химия, 1987. – 312 с.

Поступила в редакцию 14.11.2018

ТРИВАЛИЙ ВПЛИВ ВОДИ НА БАЛІСТИТНІ СКЛАДИ

М.Ф. Буллер, В.А. Роботко

Досліджено тривалий вплив (більше трьох років) води в рідкому і пароподібному стані на основні властивості баліститних палив. Встановлено, що в залежності від відносної вологості навколишнього повітря і початкового вмісту вологи в паливі початково (до 200 діб) в процесі витримування відбувається або швидкий набір, або втрата маси за рахунок міграції вологи. Згодом (більше 200 діб) спостерігається постійне падіння маси зразків, причиною якого є видалення з палива летких компонентів (рідкі пластифікатори). За отриманими експериментальними даними розраховані коефіцієнти дифузії вологи і летких компонентів палив. Коефіцієнти дифузії летких компонентів не залежать від вологості навколишнього повітря. Проаналізовано вплив атмосферної вологи в процесі витримування на теплоту згорання і густину баліститних палив. В роботі досліджено процес міграції компонентів баліститних складів у водне середовище впродовж тривалого часу (більше двох років). На підставі здійснених досліджень розраховані коефіцієнти дифузії нітрогліцерину, динітротолуолу і централіту-II у воду. Міграція компонентів у воду відбувається з тонкого зовнішнього шару порохового елемента і визначається низькою розчинністю компонентів баліститних палив.

Ключові слова: баліститне паливо, дифузія, волога, теплота згорання, густина.

LONG-TERM INFLUENCE OF WATER ON DOUBLE-BASE PROPELLANTS

M.F. Buller^a, V.A. Robotko^{b,*}

^a Shostka Institute of Sumy State University, Shostka, Ukraine

^b State Scientific-Research Institute of Chemical Products, Shostka, Ukraine

* e-mail: robotkovaleriy@gmail.com

The paper reports the long-term influence (more than 3 years) of water in a liquid and vaporous state on the main properties of double-base propellants. It was established that either a quick increase or a loss of weight due to the moisture migration occurs originally during the experiment (up to 200 days), depending on the relative humidity of an ambient air and the initial content of moisture in a propellant. Subsequently (more than 200 days), a continuous weight loss of the samples was observed that is explained by the removal of volatile components (i.e. liquid plasticizers) from a propellant. Using the obtained experimental data, the diffusion coefficients of moisture and propellant volatile components were calculated. Diffusion coefficients of volatile components do not depend on the humidity of an ambient air. The effects of atmospheric moisture during the experiment on the combustion heat and density of double-base propellants were analyzed. The process of migration of double-base propellant components into a surrounding aqueous medium was investigated in the course of a long-term exposure (more than 2 years). On the basis of the performed study, diffusion coefficients of nitroglycerine, dinitrotoluene and centralite-II into water were calculated. Migration of double-base propellant components into water occurs from a thin external layer of the propellant element and is determined by the low solubility of the components of double-base propellants.

Keywords: double-base propellants; moisture; diffusion; combustion heat; density.

REFERENCES

1. Guo S., Wang Q., Sun J., Liao X., Wang Z.-S. Study on the influence of moisture content on thermal stability of propellant. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, pp. 536-541.
2. Zelenskiy V.P., *Ekspluatatsionnye svoystva porokhov i zaryadov* [Operational properties of gunpowder and charges]. Penza, 1975. 358 p. (in Russian).
3. Mezhevich G.V., Buller M.F., Robotko V.A. Sklad pokhidnykh dyfenilaminu i tryvalist zberigannya piroksylinovykh porokhiv [Composition of diphenylamine derivatives and shelf-life of single-base gunpowder]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2017, no. 4, pp. 63-70. (in Ukrainian).
4. Suceca M., Musanic S.M., Houra I.F. Kinetics and enthalpy of nitroglycerin evaporation from double base propellants by isothermal thermogravimetry. *Thermochimica Acta*, 2010, vol. 510, pp. 9-16.
5. Jelisavac L., Bobic N., Stojiljkovic S., Dimic M., Brzic S., Terzic S. Analysis of the aging process of double-base propellants without an organic stabilizer. *Scientific Technical Review*, 2014, vol. 64, no. 3, pp. 3-9.
6. Chalykh A.E., *Diffuziya v polimernykh sistemakh* [Diffusion in polymeric systems]. Khimiya, Moscow, 1987. 312 p. (in Russian).