

А. В. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: spark002@mail.ru)

Г. К. ИВАХНЮК, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 26; e-mail: fireside@inbox.ru)

Л. В. МЕДВЕДЕВА, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: luvlmed@mail.ru)

УДК 614.841.343:539.097

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Представлены результаты исследований физических свойств этанола в условиях модификации углеродными наноразмерными комплексами. Приведены рамановские спектры использованных в исследовании углеродных нанотрубок, характеризующие их чистоту и функционализацию. Представлены спектры комбинационного рассеяния многослойных углеродных нанотрубок. С помощью атомно-силовой микроскопии установлен факт переориентации углеродных нанотрубок в условиях воздействия переменного частотно-модулированного потенциала. Показано, что внедрение углеродных нанотрубок в этанол увеличивает его электропроводность и время истечения, снижает давление насыщенного пара жидкости. Сделаны выводы о возможности использования электрофизических и нанотехнологических методов для управления свойствами углеводородных жидкостей с целью снижения пожарной опасности процессов их хранения и транспортировки.

Ключевые слова: легковоспламеняющиеся жидкости; статическое электричество; электропроводность; углеродные нанотрубки; наножидкости; вязкость.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37

Введение

Жидкие среды преобладают в природе и обычно считаются промежуточным состоянием вещества между газом и твердым телом. В чистом виде жидкости практически не встречаются, а чаще всего представляют собой растворы и суспензии. Основными физическими свойствами, определяющими характеристики жидкостей, являются их вязкость, текучесть, смачивание, диффузия, теплопроводность, электропроводность и ряд других свойств.

Согласно ГОСТ Р 12.3.047–2012 при оценке пожарной опасности технологического процесса, наряду с другими показателями, необходимо учитывать интенсивность испарения горючих веществ и материалов, параметры истечения для жидкостей и газов, концентрационные пределы распространения пламени для горючих смесей в технологических аппаратах и оборудовании. Немаловажную роль при оценке возможности воспламенения взрывоопасных смесей легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и

горючих (ГЖ) жидкостей при возникновении разрядов статического электричества (СЭ) играет величина электрического сопротивления заземлителя и среды (ГОСТ Р 52274–2004).

Способы изменения характеристик жидкостей

Существующие способы изменения характеристик жидкостей можно условно разделить на безреагентные и реагентные. Безреагентные способы модификации позволяют изменить физические и эксплуатационные свойства веществ при воздействии электрических и магнитных полей.

Воздействие высокочастотных электромагнитных полей (до 10 кВ/м) ускоряет процессы кристаллизации парафинов, что связано с изменением диэлектрической проницаемости жидкости и укрупнением кристаллов в растворе [1].

При воздействии электрических полей с максимальным напряжением на электродах 2 кВ происхо-

Таблица 1. Свойства углеводородных жидкостей, модифицированных углеродными наночастицами

№ п/п	Источник	Базовая жидкость	Характеристика наночастиц	Свойства наножидкости в сравнении с базовой
1	Yu W., Xie H., Chen W. [4]	1,2-пропиленгликоль (PG)	5 % об. оксида графена (0,5...3 мкм), диспергирование ультразвуком (40 кГц)	Повышение теплопроводности на 62 %
		Жидкие парафины (LP)		Повышение теплопроводности на 76,8 %
2	Yu W., France D. M., Routbort J. L., Choi S. [5]	Полиальфа-олефины	0,04...1,02 % об. MWCNT ($d = 25$ нм, $l = 50$ мкм), двухстадийное диспергирование	Повышение теплопроводности в 1,02...2,57 раз
		Этиленгликоль (EG)	0,23...1,00 % об. MWCNT ($d = 15$ нм, $l = 30$ мкм), двухстадийное диспергирование	Повышение теплопроводности в 1,02...1,13 раз
		Машинное масло	1...2 % об. MWCNT ($d = 50$ нм, $l = 1...100$ мкм), в сочетании с N-гидроксисукцинимидом	Повышение теплопроводности в 1,09...1,3 раз
		Дизельное топливо	0,25...1 % об. SWCNT ($d = 50$ нм, $l = 1...100$ мкм), двухстадийное диспергирование	Повышение теплопроводности в 1,1...1,46 раз
3	Baby T. T., Ramaprabhu S. [6]	Этиленгликоль (EG)	0,056 % об. графена, (0,7...3,0 мкм), диспергирование ультразвуком (30 кГц) при $T = 25...50$ °C	Повышение теплопроводности на 5...10 %, электропроводности — в 3...6 раз
4	Панин Ю. П., Прилепо Ю. П., Торба Ж. Н., Чуйко А. Г. [7]	Этанол	0,5...3,0 % об. MWCNT ($d = 10...30$ нм)	Повышение электропроводности в 2...15 раз

дит рост интенсивности массопереноса в системах *жидкость – жидкость*, что может быть объяснено изменением поверхностного натяжения на границе раздела фаз. Изменение параметров взаимной диффузии в смеси жидкостей происходит при воздействии постоянных электрических полей с напряженностью $1,4 \cdot 10^2$ кВ/м [2].

Воздействие электрического поля на жидкие углеводородные системы с потенциалом на электродах 15–20 кВ приводит к повышению интенсивности испарения за счет более активного образования ионов в диэлектрическом пограничном слое, который претерпевает изменение при электрополевом воздействии [3].

При модификации жидкостей углеродными нанотрубками (УНТ) и другими углеродсодержащими наночастицами (реагентный метод) происходит изменение их теплофизических и электрических характеристик, коэффициента вязкости и поверхностного натяжения. В табл. 1 приведены данные по изменению свойств углеводородных жидкостей при внедрении в них наночастиц — графена, однослойных (SWCNT) и многослойных (MWCNT) УНТ.

Материалы для исследований

В исследовании использовались MWCNT, полученные методом каталитического пиролиза на установке роста УНТ “CVDomna”. Функционализация УНТ проводилась в процессе отжига в муфельной печи при температуре 250...300 °C и последующем окислении в азотной кислоте. Для контрольных измерений выбраны нефункционализированные УНТ

со следами аморфного углерода. В качестве базовой жидкости применялся этиловый спирт (ГОСТ Р 55878–2013).

Дальнейшая модификация наножидкостей (НЖ) проводилась при диспергировании УНТ в среде этанола в ультразвуковой ванне с частотой 100 кГц в условиях воздействия переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) [8].

Исследование УНТ методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рамановской спектроскопии

Образцы жидкости с УНТ помещались на слюдяную подложку, на которой этанол испарялся в течение 10 мин при нормальных условиях. Затем проводилось комбинированное исследование структуры подложки методами АСМ и рамановской спектроскопии.

На рис. 1 приведены результаты АСМ образцов УНТ на слюдяной подложке. Из рис. 1 видно, что нефункционализированные УНТ содержат большое количество аморфного углерода, являющегося побочным продуктом при получении нанотрубок. Функционализированные УНТ представляют собой протяженные цилиндрические структуры ($d = 30$ нм, $l = 2...5$ мкм).

Рамановские спектры УНТ на слюде (длина волны лазера 532 нм), нефункционализированных и очищенных от аморфного углерода, представлены на рис. 2. Характерной для УНТ является D-полоса в области $1250...1450$ см⁻¹, характеризующая дефектность образца, а также G-полоса, наличие которой

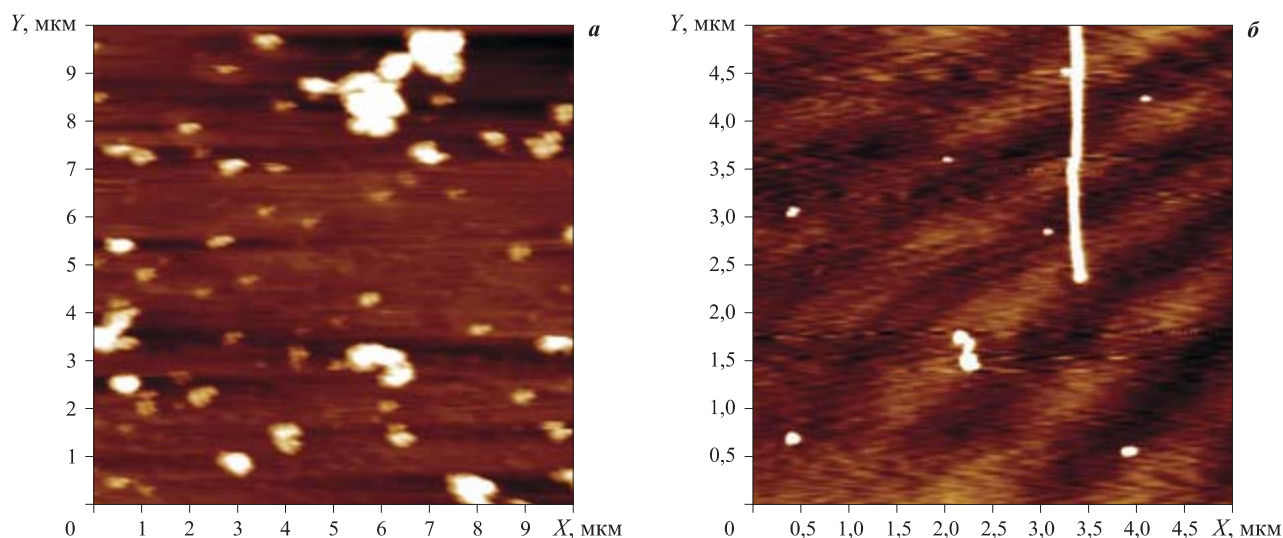


Рис. 1. АСМ нефункционализированных (а) и функционализированных (б) УНТ на слюдяной подложке

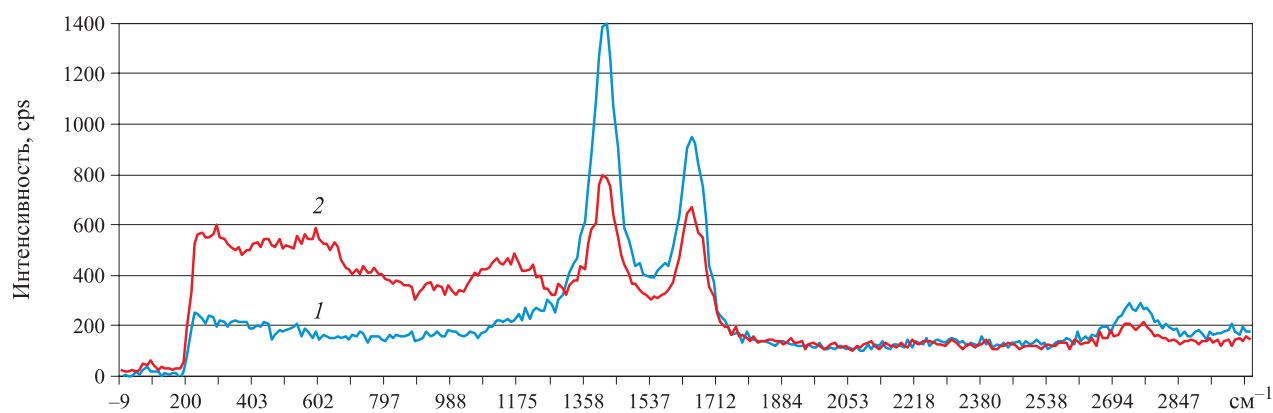


Рис. 2. Рамановские спектры функционализированных (1) и нефункционализированных (2) MWCNT

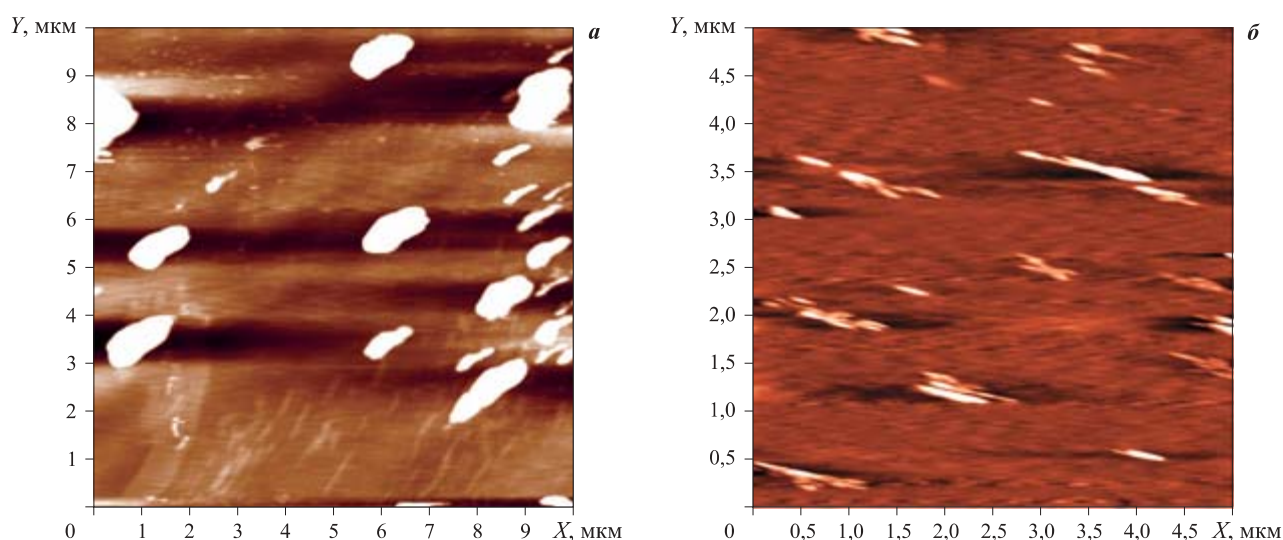


Рис. 3. АСМ нефункционализированных (а) и функционализированных (б) УНТ на слюдяной подложке при воздействии ПЧМП

обусловлено колебаниями углерода в плоскости графенового слоя в области $1500 \dots 1600 \text{ см}^{-1}$. Соотношение интенсивностей D/G полос характеризует

соотношение в образце материалов с разупорядоченной структурой и используется для определения частоты УНТ [9].

При воздействии ПЧМП происходит изменение величины электрического заряда в двойном электрическом слое, что приводит к отталкиванию между нанокластерами. В результате происходит переориентация (выстраивание) УНТ вдоль одной оси и уменьшение количества агломераций УНТ в сравнении с контрольными образцами (рис. 3), что исключает одну из причин возникновения физико-химической анизотропии в системе НЖ [14].

Исследование электропроводности наножидкостей

Измерение электропроводности НЖ, модифицированных MWCNT в концентрации 0,02...1,6 % об., проводилось с помощью моста постоянного тока [11]. В базовой жидкости происходило диспергирование УНТ в течение 10...15 мин при температуре 25 °С. Затем в емкость с НЖ вводили две металлические пластины на расстоянии 10 мм друг от друга и проводили измерение силы тока и расчет сопротивления жидкости.

Результаты измерений представлены на рис. 4. Из проведенных наблюдений можно сделать вывод о повышении электропроводности НЖ на основе MWCNT до 2,5 раз для функционализированных УНТ и до 1,8 раз — для нефункционализированных.

Следует отметить, что для нефункционализированных УНТ аномальный рост электропроводности наблюдается при концентрации до 0,1 % об., однако затем происходит ее снижение. Можно предположить, что это связано с более высокой скоростью образования агломераций наночастиц для нефункционализированных УНТ. Электрическая проводимость НЖ при небольших объемных долях УНТ имеет перколяционный характер, в соответствии с которым нанотрубки во взаимодействии друг с другом образуют в системе базовой жидкости проводящие каналы. Таким образом, при малом содержании присадки небольшое ориентационное упорядочение приводит к повышению электропроводности.

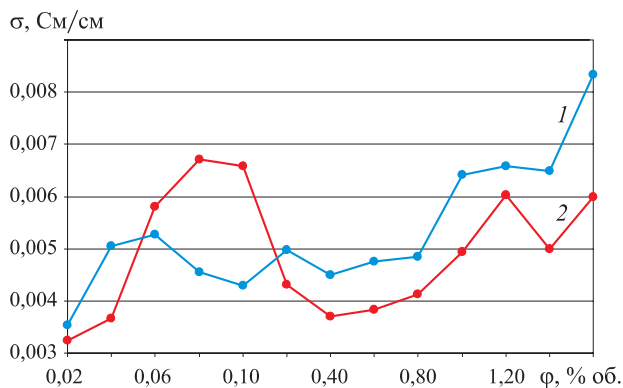


Рис. 4. Зависимость электропроводности НЖ на основе этанола с функционализированными (1) и нефункционализированными (2) MWCNT

В свою очередь, резкий рост электропроводности может характеризовать порог перколяции по таким качественным характеристикам УНТ, как их размеры, чистота, степень агрегации и др. В полученных НЖ возможно образование пространственной проводящей структуры, обеспечивающей электрический транспорт по тоннельному переходу в фиксируемой концентрации. Увеличение концентрации УНТ и создание пространственного каркаса могут проявляться в повышении вязкости НЖ [7].

Исследование поверхностного натяжения и кинетики изменения давления насыщенного пара наножидкостей

Исследование поверхностного натяжения и кинетики изменения давления насыщенного пара НЖ в условиях модификации MWCNT (1 %) УНТ проводилось в соответствии с [12, 13].

Поверхностное натяжение НЖ σ может быть рассчитано по формуле

$$\sigma = \rho g V / (n \pi d), \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³;
 g — ускорение свободного падения, м/с²;
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;
 V — объем жидкости, м³;
 n — наблюдаемое число капель.

Исследование НЖ на основе этанола с MWCNT проводилось в условиях воздействия ПЧМП с параметрами потенциала 112 В и несущей частотой 50 Гц [8].

Можно также отметить рост времени истечения НЖ по мере увеличения концентрации УНТ (рис. 5). Воздействие ПЧМП позволяет сократить время истечения для нефункционализированных MWCNT. При этом время истечения НЖ на основе функционализированных MWCNT при воздействии ПЧМП заметно увеличивается, что может быть обусловлено ростом вязкости базовой жидкости.

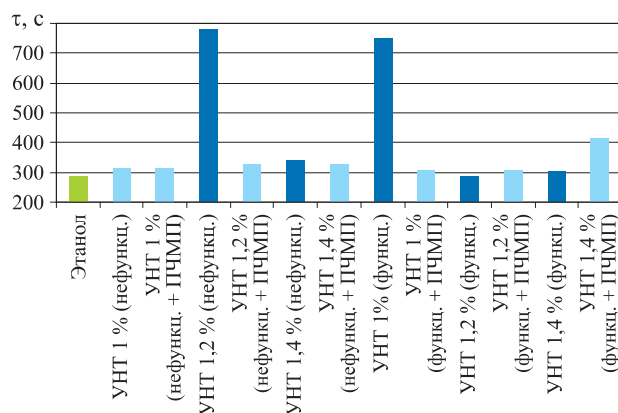


Рис. 5. Время истечения НЖ τ на основе этанола с MWCNT без внешнего воздействия и в условиях воздействия ПЧМП

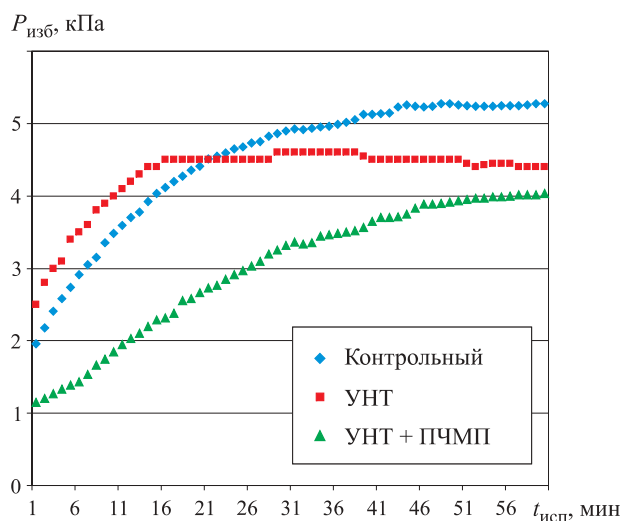


Рис. 6. Кинетика изменения давления насыщенного пара этанола $P_{\text{изб}}$ в условиях модификации MWCNT

Результаты исследования изменения давления насыщенного пара представлены на рис. 6. Наблюдалось снижение скорости роста давления насыщенного пара этанола в условиях воздействия ПЧМП при диссоциации MWCNT в НЖ. Стабилизация давления насыщенного пара в образце происходила для

этанол с УНТ на 20-й минуте, в то время как для контрольного образца — на 40-й минуте, а для НЖ с УНТ при воздействии ПЧМП — на 50-й минуте. Данный эффект может быть объяснен при допущении, что время релаксации для жидкости с УНТ без внешнего воздействия достигается значительно раньше, нежели при воздействии ПЧМП [12].

Исследование влияния УНТ на время испарения наножидкостей

Исследование влияния УНТ на время испарения этанола с открытой поверхности проводилось при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °С. Наблюдения проводились в течение 24 ч. Модификация НЖ MWCNT осуществлялась в течение 30 мин до начала эксперимента при воздействии ПЧМП.

Результаты наблюдений (рис. 7 и 8) в целом показали сокращение количества испарившейся жидкости в сравнении с контрольными образцами на 30...60 %, что обуславливает устойчивость НЖ к деградации. Вместе с тем при концентрации УНТ 1,2 % об. наблюдается рост количества испарившейся жидкости, что требует дополнительных исследо-

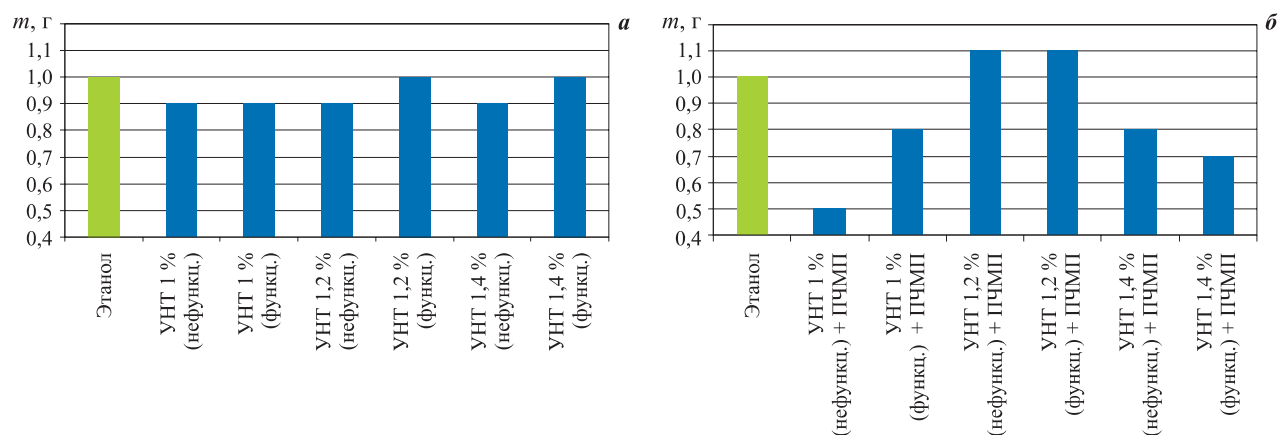


Рис. 7. Изменение массы НЖ, испарившейся с УНТ, через 6 ч: а — контрольные образцы; б — при воздействии ПЧМП

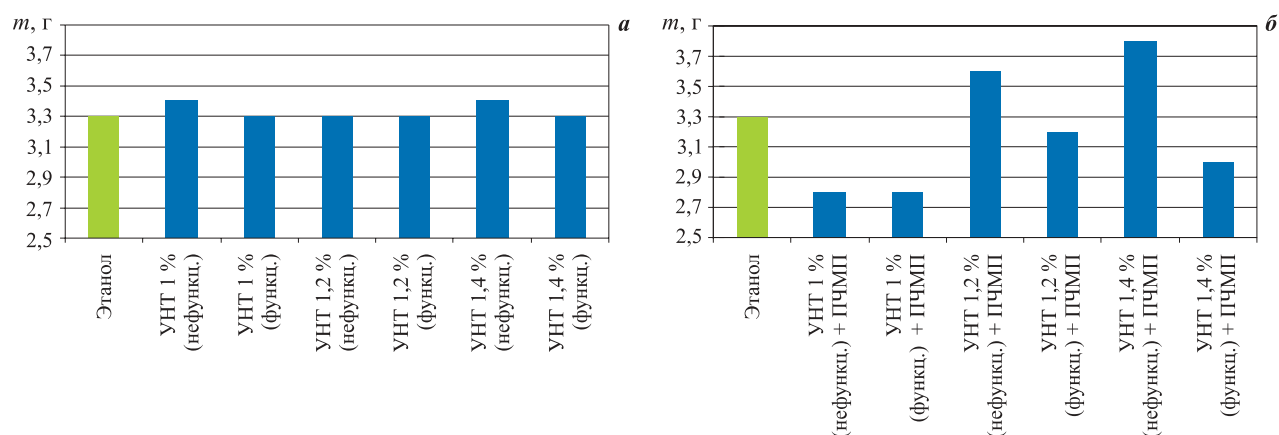


Рис. 8. Изменение массы НЖ, испарившейся с УНТ, через 24 ч: а — контрольные образцы; б — при воздействии ПЧМП

ваний. При воздействии ПЧМП в большинстве случаев наблюдается сокращение количества испарившейся НЖ.

Выводы

1. MWCNT оказывают влияние на электрофизические характеристики жидкости и снижают ее пожароопасные свойства, а именно повышают электропроводность и вязкость, снижают скорость испарения и давление насыщенного пара, что ограничивает возможность образования горючей среды и вероятного источника зажигания — искровых разрядов статического электричества.

2. Механизм управления свойствами НЖ зависит от физических свойств жидкости и наночастиц, а также от параметров внешнего воздействия. Применение ПЧМП позволяет управлять пожароопас-

ными свойствами НЖ без использования дополнительных реагентов, которые, как правило, меняют качественный состав базовой жидкости, что особенно важно в технологиях синтеза материалов [14] с различными функциональными свойствами.

3. Развитие нанотехнологических методов управления свойствами углеводородных жидкостей (создание НЖ с регулируемыми параметрами наночастиц и безреагентная модификация) позволит решить целый ряд задач в целях обеспечения пожарной безопасности при хранении и транспортировке ЛВЖ и ГЖ (снижение концентрации паровоздушной смеси в свободном пространстве аппаратов, уменьшение объема розливов жидкостей при авариях, обеспечение электростатической безопасности процессов и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатыхов М. А., Багаутдинов Н. Я. Воздействие электромагнитного поля на процесс кристаллизации парафина // Нефтегазовое дело. — 2007. — № 1. — С. 1–4.
2. Савиных Б. В., Гумеров Ф. М. Взаимная диффузия жидкостей в электрических полях // Бутлеровские сообщения. Химия и компьютерное моделирование. — 2002. — № 10. — С. 213–220.
3. Красиков Н. Н. О бесконтактном электрополевым воздействии на жидкие системы // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, № 10. — С. 120–121.
4. Yu W., Xie H., Chen W. Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing graphene oxide nanosheets // Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 107, No. 9. — P. 094317. DOI: 10.1063/1.3372733.
5. Yu W., France D. M., Routbort J. L., Choi S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements // Heat Transfer Engineering. — 2008. — Vol. 29, No. 5. — P. 432–460. DOI: 10.1080/01457630701850851.
6. Baby T. T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids // Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 108, No. 12. — P. 124308. DOI: 10.1063/1.3516289.
7. Панин Ю. В., Прилепо Ю. П., Торба Ж. Н., Чуйко А. Г. Исследование электрической проводимости в спиртовых суспензиях многослойных углеродных нанотрубок // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2012. — Т. 8, № 2. — С. 70–72.
8. Пат. 2479005 Российская Федерация. МПК G05B 24/02 (2006.01), H03B 28/00 (2006.01). Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Ивахнюк Г. К., Матюхин В. Н., Ключков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк К. Г., Иванов А. В., Родионов В. А. — № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.
9. Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 4. — С. 351–373.
10. Hong H., Luan X., Horton M., Li C., Peterson G. P. Alignment of carbon nanotubes comprising magnetically sensitive metal oxides in heat transfer nanofluids // Thermochimica Acta. — 2011. — Vol. 525, No. 1-2. — P. 87–92. DOI: 10.1016/j.tca.2011.07.025.
11. Ларионов В. В., Веретельник В. И., Тюрин Ю. И., Чернов И. П. Физический практикум. Ч. 2: Электричество и магнетизм. Колебания и волны : учебное пособие для студентов высших учебных заведений. — Томск : Изд-во Том. ун-та, 2004. — 258 с.
12. Иванов А. В., Ивахнюк Г. К. Применение электрофизического метода управления процессами парообразования легковоспламеняющихся жидкостей в условиях модификации углеродными наноконпонентами // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2015. — № 3. — 9 с. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V73/1.pdf> (дата обращения: 28.04.2016).
13. Сизов Е. Г., Беховых Ю. В. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум : учебное пособие. — Барнаул : Изд-во АГАУ, 2011. — 108 с.

14. Сусоров И. А., Бабкин О. Э. Анализ закономерностей синтеза олигомерных и высокомолекулярных соединений методом цепной полимеризации : монография. — СПб., 2015. — 238 с.

Материал поступил в редакцию 31 мая 2016 г.

Для цитирования: Иванов А. В., Ивахнюк Г. К., Медведева Л. В. Методы управления свойствами углеводородных жидкостей в задачах обеспечения пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 30–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.

English

METHODS OF CONTROL PROPERTIES OF HYDROCARBON LIQUIDS IN THE PROBLEMS OF FIRE SAFETY

IVANOV A. V., Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of Fire safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: spark002@mail.ru)

IVAKHNYUK G. K., Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg State Technology Institute (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; e-mail address: fireside@inbox.ru)

MEDVEDEVA L. V., Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of Department of Physico-Technical Basics of Fire Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: luvlmed@mail.ru)

ABSTRACT

When assessing the level of fire danger of technological process it is necessary to consider the rate of evaporation of the combustible substances and materials, the expiration settings for liquids and gases, concentrated limits of flame propagation for the combustible mixtures in technological devices and equipment.

There are presented the Raman spectra of multilayer carbon nanotubes (CNT) used in the experiments. It's demonstrated reorientation of multiwalled carbon nanotubes external influence variable frequency-modulated potential by atomic force microscopy, that eliminates one of the causes of physical and chemical anisotropy in nanofluids system. The electrical conductivity nanofluids of ethanol-based with multilayer carbon nanotubes increases by 2.5 times by increasing the concentration of CNTs, their functionalization and increasing defects. Presumably the electrical conductivity of nanofluids with low volume fraction of CNTs has a percolation nature, according to which the nanotubes in conjunction with each other to form a base fluid system of conducting channels. In conditions at low content of small orientational ordering additive increases the conductivity. The expiration time of the liquid hydrocarbon with multiwalled nanotubes is increased by 20–35 % with an increase in the CNT concentration. The rate of change of pressure in the saturated ethanol vapor modifications multiwall carbon nanotubes and subjected to the influence of the frequency-modulated potential during the first 15 minutes decreases in average 1.5 times.

The rate of weight loss is significantly reduced, which increases fire protection fluid with additives CNT. The mass of evaporated nanofluids with ethanol-based multilayer CNT generally decreased by 30–60 % compared to the base fluid that causes nanofluids stability to thermal degradation index and determines the rheological properties.

The mechanism controlling the properties of nanofluids depends on the physical properties of fluid and nanoparticles, as well as the parameters of external influence. The development of nanotechnology methods of controlling the properties of hydrocarbon liquids (creation bottom with adjustable parameters of nanoparticles and chemical free option) will allow you to solve a number of tasks to ensure fire safety in the storage and transportation of flammable liquids and combustible liquids.

Keywords: flammable liquids; static electricity; electrical conductivity; carbon nanotubes; nanofluids; viscosity.

REFERENCES

1. Fatykhov M. A., Bagautdinov N. Ya. Effects of electromagnetic fields on the wax crystallization process. *Neftegazovoe delo (Oil and Gas Business)*, 2007, no. 1, pp. 1–4 (in Russian).
2. Savinykh B. V., Gumerov F. M. Interdiffusion liquids in electric fields. *Butlerovskiyee soobshcheniya. Khimiya i kompyuternoye modelirovaniye (Butlerov Communications. Chemistry and Computational Simulation)*, 2002, no. 10, pp. 213–220 (in Russian).
3. Krasikov N. N. About contactless electric field effect on the liquid system. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics)*, 2000, vol. 70, no. 10, pp. 120–121 (in Russian).
4. Yu W., Xie H., Chen W. Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing graphene oxide nanosheets. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 107, no. 9, p. 094317. DOI: 10.1063/1.3372733.
5. Yu W., France D. M., Routbort J. L., Choi S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 432–460. DOI: 10.1080/01457630701850851.
6. Baby T. T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, no. 12, p. 124308. DOI: 10.1063/1.3516289.
7. Panin Yu. V., Prilepo Yu. P., Torba Zh. N., Chuyko A. G. Study of electrical conductivity in alcohol suspensions of multilayer carbon nanotubes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (The Bulletin of Voronezh State Technical University)*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 70–72 (in Russian).
8. Ivakhnyuk G. K., Matyukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knyazev A. S., Ivakhnyuk K. G., Ivanov A. V., Rodionov V. A. Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on phase boundary. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10.04.2013 (in Russian).
9. Udovitskiy V. G. Methods for assessing purity and characterization of properties carbon nanotubes. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti (Physical Surface Engineering)*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 351–373 (in Russian).
10. Hong H., Luan X., Horton M., Li C., Peterson G. P. Alignment of carbon nanotubes comprising magnetically sensitive metal oxides in heat transfer nanofluids. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 525, no. 1–2, pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.tca.2011.07.025.
11. Larionov V. V., Veretelnik V. I., Tyurin Yu. I., Chernov I. P. *Physics practicum. Part 2: Electricity and Magnetism. Vibrations and Waves: A manual for students in higher education*. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 2004. 258 p. (in Russian).
12. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K. Electrophysical control methods of vaporization of flammable liquids with carbon nanoparticles. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii (Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia)*, 2015, no. 3. 9 p. (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V73/1.pdf> (Accessed 28 April 2016).
13. Sizov E. G., Bekhovykh Yu. V. *Mechanics and molecular physics: laboratory workshop*. Barnaul, AGAU Publ., 2011. 108 p. (in Russian).
14. Susorov I. A., Babkin O. E. *Analysis of the laws of the synthesis of oligomeric and high-molecular compounds of chain polymerization method. Monography*. St. Petersburg, 2015. 238 p. (in Russian).

For citation: Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Medvedeva L. V. Methods of control properties of hydrocarbon liquids in the problems of fire safety. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 30–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.