

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ИНЖЕНЕРНО- ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

**Л.В. Медведева, доктор педагогических наук, профессор, заслуженный
работник высшей школы Российской Федерации;**

О.А. Дубовский;

О.М. Пелекшин;

А.М. Ожерельев.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Представлены результаты научно-исследовательской работы курсантов факультета пожарной безопасности по созданию комплекса лабораторных установок для изучения физико-технических свойств жидкости на лабораторно-практических занятиях по физике.

Ключевые слова: свойства огнетушения, очаг горения, поверхностное натяжение, вязкость, скользкая вода, вязкая вода, лабораторно-практическое занятие

EXPERIMENTAL STUDY OF PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF LIQUID IN TRAINING ENGINEERS AND TECHNICIANS SPECIALISTS

L.V. Medvedeva; O.A. Dubovskiy; O.M. Pelekshin; A.M. Ozhereliev.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article reveals the results of research work of students of the Faculty of fire to create complex laboratory facilities for the study of physical and technical properties of liquid in the laboratory and practical lessons in physics.

Keywords: fire-fighting properties, hearth burning, surface tension, viscosity, water is slippery, viscous water, laboratory and practical lessons

Наиболее распространенным средством пожаротушения является вода, физико-техническими свойствами которой являются высокая теплоемкость (теплота парообразования составляет 2 258 Дж/г), термическая стойкость (свыше 1 700 °С), значительное увеличение объема при парообразовании (1 кг воды образует при испарении свыше 1 700 л пара). Такие свойства воды обеспечивают эффективное охлаждение не только горящих объектов, но и объектов, расположенных вблизи очага горения, что позволяет предотвратить разрушение, взрыв и загорание последних, разбавление реагирующих веществ в зоне горения и изоляция горючих веществ от зоны горения.

Воду применяют для тушения твердых горючих материалов, создания водяных завес и охлаждения объектов (технологических установок, аппаратов, сооружений, зданий и др.), расположенных вблизи очагов горения.

Воду не применяют для тушения установок и оборудования, находящихся под напряжением, в связи с ее высокой электропроводностью.

При тушении водой легких нефтепродуктов и других горючих веществ с плотностью меньше плотности воды они всплывают и продолжают гореть на ее поверхности. Более того, площадь горячей поверхности при этом увеличивается, что существенно может усложнить условия тушения пожара.

Подача воды к очагу горения может быть в виде:

- сплошной (компактной) струи из лафетных стволов с насадками диаметром 28–50 мм или из ручных пожарных стволов с насадками диаметром 13–25 мм;
- распыленной струи при диаметре капель воды свыше 100 мкм;
- тонкораспыленной струи с диаметром капель воды до 100 мкм, полученной из стационарных или переносных распылителей;
- растворов, содержащих 0,2–2,0 % массы смачивателей для снижения поверхностного натяжения;
- водобромэтиловой эмульсии, содержащей 90 % массы воды и 10 % бромистого этила.

Абдурегимов И.М. отмечает удивительное свойство водных растворов, заключающееся в их способности растекаться и удерживаться на поверхности горючих углеводородных жидкостей, плотность которых на 15–20 % ниже плотности раствора пенообразователя. При использовании воды из водоисточников для пожарных целей учитывают ее огнетушащий эффект, морозоустойчивость, коррозионное воздействие, стойкость к продолжительному хранению, химическое взаимодействие воды с различными добавками, вводимыми для повышения эффекта ее использования, и другие свойства, определяющие условия ее применения [1].

Введение небольшого количества поверхностно-активных добавок в воду может повысить огнетушащие свойства воды почти в два раза. Применение загустителей – различных добавок к воде, увеличивающих вязкость и одновременно повышающих адгезию воды (способность воды прилипать к поверхности твердого горящего тела), также позволяет повысить эффективность действия воды при тушении пожаров. И, наконец, введение в воду совсем незначительного количества высокомолекулярных полимеров (сотые и даже тысячные доли процента) позволяет сократить удельное сопротивление транспортирующей такую воду трубопроводов почти в два раза. При этом отмечается эффект увеличения дальности как сплошных, так и распыленных водяных струй. В качестве смачивателей (поверхностно-активных добавок) используют пенообразователь ПО-1 и заменяющие его пенообразователи, а также смачиватель ДБ, представляющий собой смесь полиэтиленгликолевых эфиров. Внешне это вязкая темно-коричневая жидкость [1].

Все существующие огнетушащие средства оказывают, как правило, комбинированное воздействие на процесс горения веществ. Например, вода может охлаждать и изолировать (или разбавлять) источник горения, пенные средства действуют изолирующе и охлаждающе, наиболее эффективные газовые средства воздействуют на процесс горения одновременно как ингибиторы и как разбавители, порошки могут ингибировать горение и создавать условия огнепреграждения при образовании устойчивого порошкового облака. Однако для любого огнетушащего средства характерно какое-либо одно доминирующее свойство. Например, вода оказывает преимущественно охлаждающее воздействие на пламя, пены – изолирующее, огнетушащие средства на основе галоидоуглеводородов и порошковые составы – специфическое ингибирующее действие. Кроме того, в зависимости от условий применения проявляется то или иное свойство огнетушащего вещества. Некоторые порошковые составы при тушении горящих металлов проявляют в основном изолирующие свойства, а при подавлении горения углеводородов – ингибирующие [1].

С позиций вышеизложенного актуализируется изучение физико-технических свойств жидкостей в процессе профессиональной подготовки специалистов инженерно-технического профиля в образовательном процессе вузов МЧС России. Физическими явлениями, от которых зависят огнетушащие свойства жидкостей, протекание и эффективность процесса пенообразования, растекаемость специальных растворов являются поверхностное натяжение и вязкость.

Поверхностное натяжение – термодинамическая характеристика поверхности раздела фаз (тел), определяемая как работа обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности [2].

Добавление небольших количеств поверхностно-активных веществ (ПАВ) к воде (0,1–2 %) резко изменяет ее свойства. Водные растворы подобных веществ обладают небольшим поверхностным натяжением, хорошей смачивающей и моющей способностью, образуют пену. Свойства, которые приобретает вода после добавления к ней небольших количеств ПАВ, повышают ее огнетушащую способность. В основном эти свойства связаны с изменением поверхностных свойств воды и проявляются на границах раздела водных растворов с пограничной фазой. Граница раздела двух фаз может быть образована водными растворами ПАВ с твердыми телами, воздухом, насыщенным паром, водонерастворимой жидкостью. Физико-химические свойства веществ на поверхности раздела двух фаз отличаются от таких же свойств в объеме. Это различие обусловлено запасом свободной энергии на поверхности раздела.

Поверхностное натяжение характеризует поверхность раздела двух фаз и является результатом межмолекулярного взаимодействия. Межмолекулярные силы проявляются на определенном, очень небольшом расстоянии, которое определяется радиусом окружностей с центрами в точках M_1 и M_2 (рис. 1). С молекулами M_1 и M_2 взаимодействуют молекулы, находящиеся внутри этих сфер. Молекула M_1 равномерно притягивается окружающими ее молекулами, находящимися от нее на равных расстояниях. Молекула A притягивает молекулу M_1 с такой же силой, как и молекула A_1 . Так же действуют молекулы B и B_1 . Таким образом, силы, действующие на молекулу M_1 уравновешены. Результирующая этих сил равна нулю. Следовательно, для перемещения молекул, находящихся внутри жидкостей, не требуется затрачивать никакой работы. Силы межмолекулярного воздействия оказывают на молекулу M_2 неравномерное влияние. Действие молекул, находящихся в жидкости, не уравновешивается действием молекул, находящихся в газовой среде, так как в газообразной фазе молекулы находятся на большем расстоянии друг от друга (плотность газовой среды значительно меньше плотности жидкости). Силы молекулярного воздействия на воздух остаются неуравновешенными. Сила, действующая на молекулу M_2 , направлена внутрь жидкости. Для «вытягивания» молекулы на поверхность требуется совершить определенную работу. Работа изотермического образования новой поверхности, отнесенная к единице площади, называется поверхностным натяжением и измеряется обычно в Ньютонах на метр или Джоулях на квадратный метр. Работа создания поверхности колеблется в широких пределах и зависит от химического строения молекул и расстояния между ними. Для воды эта работа велика из-за большой силы сцепления между молекулами, а для углеводородных жидкостей намного меньше.

Поверхностное натяжение с повышением температуры уменьшается. Для большей части жидких веществ падение поверхностного натяжения с ростом температуры имеет линейный характер. Поверхностное натяжение жидких веществ, например воды, может быть снижено и при обычной температуре добавлением ПАВ. Обладая меньшим поверхностным натяжением, чем вода, и концентрируясь в поверхностном слое, они уменьшают поверхностное натяжение. Процесс концентрирования вещества в поверхностном слое называется адсорбцией.

Для того чтобы вещество было поверхностно-активным в водной среде, его молекулы должны иметь резко выраженное асимметричное строение. Они должны иметь небольшую полярную гидрофильную (родственную воде) группу, например OH , NH_2 , COOH , OSO_2H и гидрофобный (не имеющий сродства к воде) сравнительно большой органический радикал, состоящий из бензольного кольца, алкильной цепочки либо соединения того и другого.

Молекулы ПАВ в поверхностном слое располагаются таким образом, что их полярная гидрофильная часть обращена к воде, а гидрофобная – к менее полярной фазе, и понижают поверхностное натяжение воды (рис. 2). При добавлении небольшого количества вещества поверхностное натяжение сначала резко снижается и при достижении определенной концентрации практически становится постоянным.

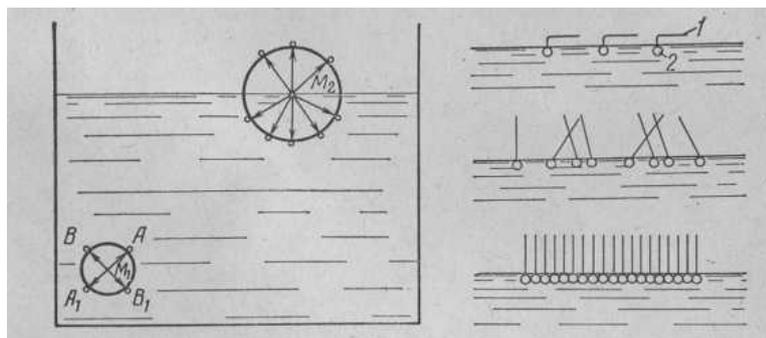


Рис. 1. Схема взаимодействия молекул

Рис. 2. Расположение молекул ПАВ в поверхностном слое:
гидрофобная часть молекулы;
гидрофильная часть молекулы

Вода, растворяя твердые неорганические вещества, хорошо смачивает их. К подобным веществам относятся соли, кислоты и т.п. Водой, как правило, приходится тушить органические вещества, например древесину, ткани и другие неродственные воде и не растворяющиеся в ней. Воды трудно проникнуть в поры подобных веществ, и при тушении

она с них стекает. Если добавить ПАВ, вода сможет проникнуть в поры веществ, растечься по их поверхности и, следовательно, можно быстро достичь эффекта тушения.

Методы, определения поверхностного натяжения делятся на статические и динамические. Для чистых неассоциированных жидкостей значения поверхностного натяжения, определяемые статическим и динамическим методами, совпадают. Для растворов ПАВ на практике поверхностное натяжение определяют полустатическим или динамическим методами. Наиболее часто применяют поднятие или опускание жидкости в капиллярной трубке, взвешивание или счет капель, максимальное давление пузырьков, отрыв кольца.

Наиболее простым является способ взвешивания или счета капель. Чем меньше поверхностное натяжение раствора, тем больше капель будет образовываться из одного и того же объема жидкостей и, следовательно, тем больше будет суммарная площадь их поверхности. В результате увеличивается скорость испарения воды, быстрее снижается температура, продукты разложения горящих веществ разбавляются до негорючих концентраций и осаждаются дым [3].

Вязкость (внутреннее трение) – одно из явлений переноса, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате происходит рассеяние в виде тепла работы, затрачиваемой на это перемещение [4]. С этим свойством связаны следующие два физико-технических состояния воды: «вязкая» вода и «скользящая» вода.

«Вязкая» вода – это вода с добавлением полимерных присадок для повышения ее адгезии со смачиваемой поверхностью, а так же хорошей растекаемостью и проникающей способностью, применяемая при тушении лесных пожаров.

«Скользкая» вода – это вода, которая получается после введения небольшого количества определенных полимерных соединений. После этого жидкость приобретает удивительные свойства. Скользящая вода течет в 2,5 раза быстрее, чем обычная, поэтому ее легко подавать сразу в большом количестве, например, при тушении пожаров.

Внутреннее трение жидкостей, как и газов, возникает при движении жидкости вследствие переноса импульса в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Справедлив общий закон внутреннего трения – закон Ньютона:

$$\tau = -\eta \frac{\partial v}{\partial n},$$

где η – коэффициент вязкости (коэффициент динамической вязкости, динамическая вязкость); $\partial v / \partial n$ – величина градиента скорости.

Значение коэффициента вязкости η будет тем меньше, чем меньше время t «оседлости» молекул. При росте температуры динамическая вязкость уменьшается, а с увеличением давления значение коэффициента вязкости растет.

В технике, в частности, при расчете гидроприводов и в триботехнике часто приходится иметь дело с величиной кинематической вязкости, которая рассчитывается по формуле:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где ρ – плотность жидкости; η – коэффициент динамической вязкости.

«Вязкая» вода. Помимо большого поверхностного натяжения вода обладает незначительной вязкостью, что отрицательно сказывается на ее огнетушащей способности. Вязкость воды можно увеличить, добавив к ней небольшие количества загущающих добавок органических соединений, например различных производных целлюлозы. При растворении веществ, повышающих вязкость, поверхностное натяжение растворов изменяется очень мало (на $3-5 \cdot 10^3$ Дж/м²), что не влияет на смачивающую способность раствора. Характер изменения времени тушения растворами со всеми добавками указывает, что наибольший эффект достигается при увеличении вязкости всего лишь до $2-3 \cdot 10^{-6}$ м²/с (табл.). Дальнейшее увеличение вязкости практически не влияет на эффективность тушения. По всей вероятности, столь незначительное увеличение вязкости способствует прилипанию довольно тонкого слоя воды к горящему предмету и является достаточным для тушения. Хотя для всех веществ оптимальным является вязкость $2-3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, время тушения в зависимости от природы вещества меняется в пределах 10–25 с. Очевидно, это связано с адгезией раствора с твердым веществом. Эффективностью тушения, или коэффициентом использования, называется отношение количества воды, непосредственно участвующее в тушении, ко всей поданной воде, выраженное в процентах. Добавляя к воде незначительные количества загущающих добавок, можно повысить коэффициент ее использования более, чем в 1,8 раза [3].

«Скользкая» вода. В связи с увеличением размеров пожаров появлением новых материалов, на тушение которых требуется повышенный расход воды, более актуальным становится использование больших количеств воды без изменения диаметра напорных труб и рукавов и рабочего давления в гидросистемах. Для решения этой задачи на стенки трубопроводов наносят специальные покрытия, уменьшающие коэффициент гидравлического сопротивления и турбулентность потока в трубах. Эта задача может быть также решена введением в воду небольших количеств высокомолекулярных веществ, молекулы которых чрезвычайно большой длины, имеющих нитевидное строение, под действием потока жидкости вытягиваются вдоль потока и ориентируют молекулы воды вдоль стенок труб. Благодаря этому уменьшается турбулентность потока, снижаются гидравлические потери в трубопроводах, что ведет к увеличению расходов жидкости через них. В качестве таких добавок используют полимеры окиси этилена и полиакриламиды. Вода с добавками этих веществ получила название «скользящей». Соединения растворяются в воде, образуя растворы, вязкость возрастает с увеличением молекулярной массы веществ и концентрации. При содержании веществ свыше 1 % вязкость резко возрастает. Как правило, текучие растворы, которые можно подсасывать к воде существующими устройствами, содержат не более 3 % высокомолекулярных соединений. Следовательно, для создания требуемого эффекта к воде следует добавлять 1–6 % подвижного раствора [3].

Таблица. Растекаемость растворов различной вязкости

Вещество	Кинематическая вязкость, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Поверхностное натяжение, $10^3 \text{ Дж}/\text{м}^2$	Растекаемость, 10^2 см^2
Вода, Натрийкарбоксиметилцеллюлоза, водный раствор	1	72,8	0,28
	1,25	71,5	0,32
	2,15	70	0,28
	7,96	70	0,32
	13,6	–	0,31
	36,2	–	0,31
Окись алкилдиметиламинов, водный раствор	1,08	29,6	1,1
	5,8	–	1,5
	11,9	26,8	1,2
	233,8	–	0,6

Разработанный комплекс лабораторных установок для изучения физико-технических свойств жидкостей и газов включает в себя три вида установок (рис.):

1. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель (2 установки).
2. Определение постоянной адиабаты воздуха (3 установки).
3. Определение коэффициента динамической вязкости воздуха методом Пуазейля (3 установки).



Рис. Комплекс лабораторных установок для изучения физико-технических свойств жидкостей и газов

Цель разработки комплекса лабораторных установок:

- изучение основных понятий, связанных с явлением поверхностного натяжения (ПН) в жидкостях, опытное определение коэффициента ПН, экспериментальное исследование его зависимости от температуры и наличия примесей;
- изучение закономерностей некоторых термодинамических процессов; определение показателя адиабаты классическим методом Клемана и Дезорма;
- изучение явления внутреннего трения в газах, экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости воздуха.

Задачами научно-исследовательской работы являлись модернизация, усовершенствование и разработка новых лабораторных установок и методик экспериментов для изучения физико-технических свойств жидкостей и газов.

Научная новизна результатов научно-исследовательской работы заключалась в том, что впервые для учебной дисциплины «Специальные главы физики» создан цикл лабораторных установок для изучения физико-технических свойств жидкостей и газов в процессе обучения курсантов, студентов и слушателей третьего курса университета ГПС МЧС России по техническим направлениям профессиональной подготовки.

Практическая значимость результатов научно-исследовательской работы заключается в том, что разработанный комплекс лабораторных установок обладает следующими показателями технической эффективности: долговечность, надежность, простота, взаимозаменяемость элементов, безопасность, а также удобство эксплуатации и обслуживания.

К важным результатам научно-исследовательской работы следует отнести:

1. Создание материально-технической базы учебной дисциплины «Специальные главы физики» для изучения раздела № 1 «Основы молекулярной физики и термодинамики».
2. Создание технических условий для проведения лабораторно-практических занятий по учебной дисциплине «Специальные главы физики» с подгруппой (16 обучающихся) в учебно-научной лаборатории нанотехнологий.
3. Создание образовательных условий для экспериментальных исследований физических явлений поверхностного натяжения и вязкости, которые являются фундаментальной основой разработки огнетушащих средств с требуемыми техническими показателями.

Литература

1. Абдурагимов И.М., Говоров В.Е., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1982.
3. Казаков М.В. Применение поверхностно-активных веществ для тушения пожаров. М.: Стройиздат, 1977.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1993.
5. Савельев И.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1986.
6. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2001.
7. Ojovan M.I., Lee W.E. J. Appl. Phys. 2004. № 95. Pp. 3 803–3 810.