

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)

А. Ф. ШАРОВАРНИКОВ, 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)

УДК 614.84.664

ФАКТОРЫ, СНИЖАЮЩИЕ ОГNETУШАЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

При анализе процесса тушения подслоиным способом особое внимание уделено результатам натурных испытаний. Представлены некоторые результаты натурных испытаний системы подслоиного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах, проведенных на полигонах в Перми, Новополючке, Астрахани и Альметьевске, а также анализ зарубежных источников. На основе анализа натурных огневых испытаний и сопоставления полученных в них результатов с модельными экспериментами выявлены оптимальные параметры системы подслоиного тушения пожаров нефти в резервуарах. Установлены факторы, снижающие огнетушащую эффективность такой системы.

Ключевые слова: огнетушащая эффективность; система подслоиного пожаротушения; натурные огневые испытания; генератор пены; кратность пены; оптимальные параметры системы пожаротушения.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.56-67

Пожары в резервуарах с нефтью чаще всего начинаются со взрыва паровоздушной среды, которая образуется в резервуаре в период откачки нефти. В результате взрыва система пожаротушения, состоящая из генераторов пены средней кратности, установленных на верхнем поясе резервуара, выходит из строя, а часть металлической крыши обрушивается внутрь резервуара, образуя “карманы”, в которые нет доступа для пены, подаваемой снаружи [1].

Таким образом, эксплуатация системы противопожарной защиты резервуаров с генераторами пены средней кратности не оправдала себя из-за низкой надежности и слабой устойчивости ко взрыву паровоздушной среды [2–4].

В 80-е годы прошлого столетия с появлением отечественных фторсодержащих пенообразователей, таких как “Подслоиный”, “Универсальный” и “Фор-этол”, началась разработка отечественного способа системы подслоиного тушения пожаров нефти в резервуарах. Наряду с отечественными пенообразователями, использовались и зарубежные — “Легкая вода” и “Гидрал”. Наиболее эффективной оказалась пена, полученная из пенообразователя “Легкая вода” [5].

На основе результатов натурных испытаний системы подслоиного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах, проведенных на полигонах в Перми, Новополючке, Астрахани и Альметьевске [6–9], а также анализа зарубежных источников [10, 11] были разработаны рекомендации по подслоиному тушению нефтепродуктов и ведомственные нормы применения системы подслоиного тушения пожаров. В 2000 г. было разработано руководство по тушению пожаров нефти и нефтепродуктов, в которое входила система подслоиного тушения пожаров. В дальнейшем система подслоиного пожаротушения была включена в ГОСТ Р 50588–2012.

Начиная с 2000 г. большинство вновь построенных и переоборудованных резервуарных парков используют систему подслоиного тушения пожаров в резервуарах, а в качестве пенообразователей — составы, содержащие фторированные стабилизаторы типа “Легкая вода”. Несмотря на использование новой системы пожаротушения и фторированных пенообразователей, тушение пожаров в резервуарных парках остается большой проблемой [12–14].

Была выявлена низкая эффективность системы подслоиного тушения пожара, что может быть обу-

словлено рядом упущений, которые допускаются в процессе подготовки и тушения и связаны с выбором пенообразователя, способом приготовления рабочего раствора, способом получения и транспортировки пены, способом введения пены в нефтепродукт. Потушить пожары в резервуарах на раннем этапе не удастся ни с помощью автоматической системы пожаротушения, ни подачей пены в основание резервуара от передвижной техники [3]. В результате пожары в резервуарных парках приобретают катастрофический характер, охватывая пламенем соседние резервуары [1, 4].

В связи с этим актуальной задачей представляется выявление оптимального режима тушения пожаров в резервуарах.

Цель настоящей работы — на базе экспериментальных исследований, проведенных в полигонных условиях и на модельном резервуаре, провести анализ системы тушения пожаров подачей пены в основание резервуара и определить оптимальный режим применения пены для тушения пожаров нефтепродуктов.

С внедрением системы подслоного тушения пожаров в резервуарах связаны большие надежды на обеспечение пожарной безопасности резервуарных парков с помощью пены, полученной на основе пенообразователей, содержащих фторированные стабилизаторы. Надежность подслоной системы была доказана зарубежными и отечественными исследованиями [15–20], поэтому низкая эффективность данной системы, выявленная в последние годы, вызывает сомнение в правильности ее организации и использования. При анализе процесса тушения подслоным способом особое внимание будет уделено результатам натурных испытаний, проведенных при участии авторов настоящей работы.

Натурные огневые эксперименты в г. Перми на резервуаре, содержащем легкую нефть с толщиной слоя 8 м, с высотой свободного борта не более 1 м показали высокую эффективность подслоной системы. При этом удалось провести только два огневых эксперимента с использованием отечественного пенообразователя “Подслоный” и зарубежного “Гидрал” (компания “Сабо”, Италия). В результате теплового воздействия факела пламени верхний пояс резервуара раскалился и начал коробиться, поэтому эксперименты были ограничены двумя зажиганиями нефти. Расчетная интенсивность подачи пены — около $0,06 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Время тушения пеной из пенообразователя “Гидрал” составило 2,5 мин, а из пенообразователя “Подслоный” — 3,5 мин. Результат тушения был признан положительным.

Следующий натурный эксперимент был проведен на пожарном полигоне в г. Альметьевске. Тушили резервуар объемом 5000 м^3 , высотой 10 м, уро-

вень легкой нефти составлял 9 м. Всего было проведено восемь экспериментов в течение трех дней.

Основное отличие данных экспериментов от известных из литературы заключалось в том, что весь резервуар был заполнен свежей нефтью до высоты 9 м. В то же время за рубежом в наиболее крупных экспериментах тушение проводилось путем подачи пены через вертикальный цилиндр диаметром 1,5 м, а слой нефти толщиной не более 1 м наливался на слой воды, который практически закрывал пространство между стенками резервуара и металлического цилиндра, установленного в центре. В результате пена в процессе подъема контактировала только с ограниченным объемом нефти.

Для выявления моментов, которые могут повлиять на эффективность подслоного способа, ниже на основе экспериментов с модельными резервуарами детально рассмотрены условия проведения экспериментов, процедуры приготовления и применения пены, оборудование, использованное для получения пены и тушения пламени нефти в резервуаре.

В процессе проведения натурных испытаний температура окружающего воздуха составляла $17\text{--}19^\circ\text{C}$, временами моросил слабый дождь, ветер был порывистый, от слабого до умеренного.

Свежая нефть, закачанная в резервуар по трубопроводу, имела температуру вспышки минус 6°C . За земляным обвалованием, устроенным вокруг резервуара, были размещены генераторы пены, которые подсоединялись к пенопроводу. Перед входом в резервуар на пенопроводе был установлен обратный клапан и коренная задвижка. Перед экспериментами коренную задвижку открывали.

Для получения пены использовали генераторы пены производительностью 9 л/с при входном давлении водного раствора $(9 \pm 1) \text{ атм}$. Эти генераторы обеспечивали получение пены кратностью 4,0 при давлении в трубопроводе $(3 \pm 0,5) \text{ атм}$. Попытки использовать более производительное оборудование были безуспешными, поскольку получить с помощью насоса пожарных автоцистерн давление раствора более $(9 \pm 1) \text{ атм}$ при расходе $(9 \pm 1) \text{ л/с}$ было невозможно. Как правило, предварительные испытания генераторов пены и насоса автоцистерны показывали более низкие значения расходов, чем удавалось получать на используемом оборудовании. В табл. 1 представлены основные параметры резервуара и расходные параметры по водному раствору пенообразователей.

На каждой линии ввода устанавливался Т-образный насадок в виде трубы с двумя открытыми концами. Наличие Т-образных насадков позволяло в два раза снизить скорость ввода пены, подаваемой в нефтепродукт через один пенопровод. При использовании двух вводов пена подавалась в горючее че-

Таблица 1. Основные параметры резервуара и расходные параметры по водному раствору пенообразователей

H_0 , м	$H_{нф}$, м	D , м	S , м ²	N	q_r , кг/с	n	Q , кг/с	J , кг/(м ² ·с)	τ_r , с	$\tau_{лок}$, с	Q_s , кг/м ²
10	9	22,8	408,1	2	8	2	16	0,0392	280	280	10,978
10	9	22,8	408,1	3	7	3	21	0,0515	140	110	7,2046
10	9	22,8	408,1	4	7	4	28	0,0686	105	85	7,2046
10	9	22,8	408,1	4	8	4	32	0,0784	105	85	8,2338

П р и м е ч а н и е . H_0 — высота резервуара; $H_{нф}$ — высота слоя нефти; D — диаметр резервуара; S — площадь поверхности резервуара; N — число линий ввода пены; q_r — расход раствора из одного генератора пены при (10 ± 1) атм; n — число генераторов пены; Q — общий расход раствора пенообразователя; J — интенсивность подачи раствора пенообразователя; τ_r — время тушения; $\tau_{лок}$ — время локализации пожара; Q_s — удельный расход пенообразователя.

рез четыре выхода, трех вводов — через шесть выходов, четырех вводов — через восемь выходов.

Для подачи пены было подключены четыре трубопровода, поэтому максимальная интенсивность подачи составила: $4 \cdot 10/615 = 0,065$ кг/(м²·с). При использовании двух или трех пенопроводов интенсивность подачи пены составляла 0,039 и 0,052 кг/(м²·с) соответственно. На рис. 1 представлены результаты натурных огневых испытаний, проведенных на резервуаре объемом 5000 м³, диаметром 23,8 м при участии авторов статьи, и испытаний подслонной системы в полигонных условиях. Высота свободного борта составляла 0,8–1,0 м.

При проведении испытаний время свободного горения составляло 3,0 мин, а отсчет начинали с момента распространения пламени на всю поверхность нефти. Уже на “холодных” экспериментах наблюдалась задержка поступления пены в резервуар из-за необходимости создания дополнительного давления, которое требовалось для открытия обратных клапанов. Если генераторы пены имели обратный клапан для предотвращения выхода раствора наружу, то в этой линии пена попадала в резервуар быстрее. Если генератор не имел предохранительного устройства, то в первые секунды раствор выплескивался наружу, а спустя 20–25 с на поверхность нефти начинала поступать пена из всех пенопроводов, к которым были присоединены генераторы пены.

Процесс тушения проходил по одинаковому сценарию. Вначале наблюдалось свободное горение, сопровождавшееся гигантским факелом и появлением высокого столба дыма. При подаче пены в трубопроводы часть водного раствора выливалась наружу через всасывающие отверстия генераторов пены. Через 20–25 с пена, преодолев обратное давление от нефти в резервуаре и сопротивление обратного клапана, начинала поступать в резервуар и всплывать на горящую поверхность. Спустя 1,0–1,5 мин высота пламени резко снижалась, частично оголяя поверхность нефти. Вся открытая поверхность оказывалась покрытой сеткой расходящихся полос пены. Поскольку пена всплывала вместе с холодной

нефтью, то на поверхности последней формировалась тонкая водная пленка раствора пенообразователя, препятствующая испарению нефти, и горение на этом участке прекращалось. Языки пламени оставались только на участках, расположенных ближе к раскаленному борту. Эта ситуация соответствует локализации пожара в резервуаре.

Локализация пламени происходила за 65–80 с. Дополнительное время требовалось на охлаждение пеной раскаленных участков свободного металлического борта, которые подвергались прямому воздействию факела пламени.

В процессе проведения огневых испытаний основное внимание уделялось влиянию расположения пенных насадков, через которые пена вводилась в нефть. Было отмечено, что при вводе пены через один насадок в месте подъема пены наблюдалось локальное возвышение уровня нефти. В этой зоне скорость движения поднимающейся вместе с пеной нефти была наибольшей, поэтому пленка водного раствора огнетушащего вещества была неспособна покрыть поверхность горящей жидкости. В результате пламя устойчиво сохранялось в месте подъема пены. После прекращения подачи пены скорость подъема слоев нефти снизу к поверхности снижалась и происходило образование тонкой водной пленки, которая вместе с натекающей пеной тушила пламя нефти.

Общим для всех проведенных огневых экспериментов было то, что наблюдалось постепенное покрытие пеной “оголенных” участков после прекращения ее подачи. Часть пены, удерживаемая циркулирующими потоками нефти, постепенно всплывала на ее поверхность. По предварительным оценкам объем всплывающей после тушения пены составлял не менее объема пены, накопленной на поверхности к моменту тушения пламени. Это наблюдение показывает, что эффективная интенсивность подачи пены, используемой для тушения пламени, в два раза ниже расчетной.

Для выявления оптимального количества насадков для ввода пены были проведены эксперименты

с подачей пены через два, три и четыре насадка. Иллюстрация влияния количества вводов пены на характер тушения представлена на рис. 1–5.

Результаты полигонных испытаний и аналогичные измерения, проведенные на модельном резервуаре, представлены на рис. 6. Абсолютные значения минимального удельного расхода и оптимальной интенсивности подачи различаются соответственно в три и два раза. Наиболее очевидным фактором, влияющим на эти параметры, является наличие раскаленной поверхности металлического пояса, подвергаемого воздействию факела пламени. Из экспериментов видно, что локализация пламени происходит за 1,0–1,5 мин, а на охлаждение свободной стенки требуется дополнительно 1–2 мин.

Вторым фактором, который также наглядно проявляется после завершения процесса тушения, — это подъем к поверхности части пены, которая, будучи увлеченной нисходящими потоками, циркулирует в объеме нефти. Открытая поверхность нефти



Рис. 1. Фрагмент огневых испытаний системы подслоного тушения пламени легкой нефти в резервуаре



Рис. 2. Фрагмент огневых испытаний: пламя в резервуаре потушено подачей пены низкой кратности в основание резервуара через один трубопровод с насадками в центре резервуара; пять линейных вводов пены расположены равномерно по окружности резервуара



Рис. 3. Заключительный этап тушения пламени легкой нефти подачей пены низкой кратности, полученной из пенообразователя «Легкая вода», через два трубопровода, расположенные с противоположных сторон резервуара



Рис. 4. Тушение пламени легкой нефти подачей пены низкой кратности, полученной из пенообразователя «Легкая вода», через четыре трубопровода, расположенные симметрично около противоположных стен резервуара



Рис. 5. Открытые участки поверхности нефти, расположенные над местом входа пены в горючую жидкость через насадки, установленные под углом 120°

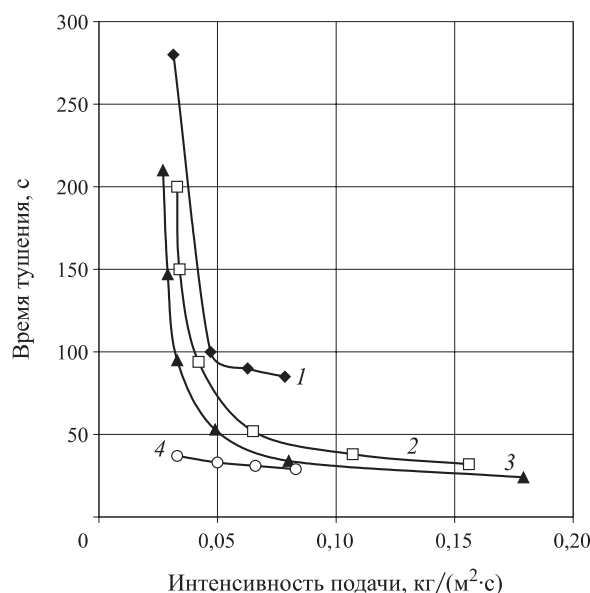


Рис. 6. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи пены, полученная в натурных испытаниях на РВС 5000 (1), на модельном резервуаре (2, 3) и в резервуаре диаметром 8,0 м (4) при кратности пены 3,0 (3) и 4,0 (2)

постепенно покрывается пеной, которая по окончании подачи поднимается и формирует плотный изолирующий слой.

Если принять, что примерно половина массы пены, поданной в резервуар, циркулирует в толще нефти, то эффективная интенсивность подачи пены на горящую поверхность должна быть в два раза меньше. Поэтому оптимальная интенсивность будет соответствовать той, которая получена на модельном резервуаре, и будет близка к критической. Попытка увеличить число пенных насадков направлена также на снижение скорости циркуляции нефти за счет близкого расположенных восходящих потоков пены.

При подготовке натурных экспериментов по тушению пламени нефти в резервуаре использовали генераторы пены, способные образовывать пену при наличии встречного гидростатического давления столба нефти в резервуаре порядка 2 атм.

Влияние кратности пены, поданной в слой нефти, на время тушения проиллюстрировано на рис. 7, где представлены результаты тушения пламени гептана в модельном резервуаре пеной различной кратности, полученной из пенообразователя “Гидрал”.

Как и ожидалось, увеличение кратности пены с 4,0 до 10,0 привело к снижению оптимальной интенсивности в два раза.

Время тушения гептана пеной кратностью от 4,0 до 10,0 при одинаковой интенсивности подачи водного раствора, равной 0,05 кг/(м²·с), снизилось со 180 до 25 с. Этот результат требует уделить особое внимание выбору способа и аппаратуры для получения пены в реальных условиях.

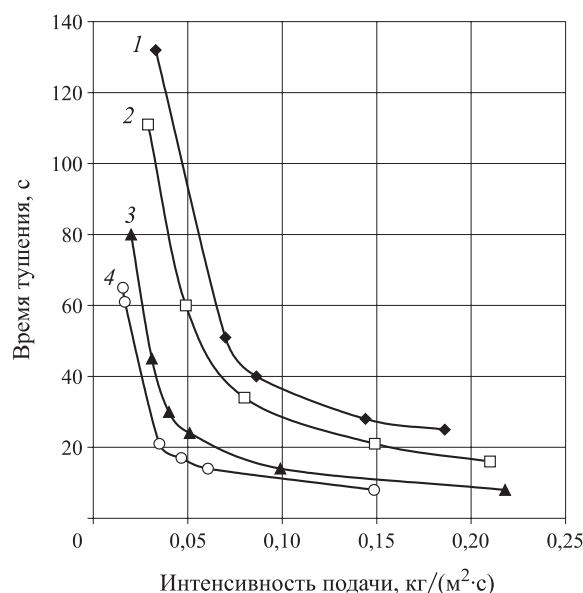


Рис. 7. Влияние кратности пены, полученной из водных растворов пенообразователя “Гидрал”, на время тушения пламени гептана подслоиным способом: 1 — кратность пены 4,0; 2 — 5,0; 3 — 7,0; 4 — 10,0

Для анализа факторов, приводящих к снижению огнетушащей эффективности системы подслоиного тушения пожаров, необходимо рассмотреть всю технологическую цепочку, включающую:

- выбор пенообразователя и его обоснование;
- способ приготовления рабочего раствора заданной концентрации; время хранения раствора до применения;
- способ получения пены заданной кратности;
- способ транспортирования пены в резервуар;
- способ ввода пены в нефтепродукт;
- взаимодействие пены с нисходящими потоками горючей жидкости в процессе ее подъема к горящей поверхности;
- термическое и контактное разрушение пены в процессе растекания по нефтепродукту;
- обеспечение периода повторного возгорания нефтепродукта из-за утраты пеной изолирующего действия.

На первом этапе выявляют пленкообразующие свойства водных растворов пенообразователей, для чего определяют зависимость поверхностного и межфазного натяжения водных растворов на границе с воздухом и гептаном от их концентрации. На рис. 8 представлена зависимость поверхностного натяжения водного раствора пенообразователя и коэффициента растекания его по гептану от концентрации пенообразователя в рабочем растворе.

На основании этих результатов рассчитывают коэффициент растекания, положительное значение которого указывает на “пленкообразующую” природу рабочего раствора пенообразователя. Коэффициент растекания водного раствора по углеводо-

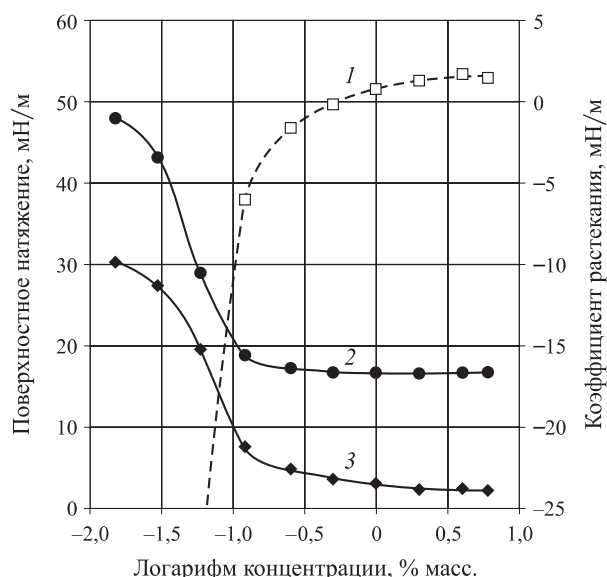


Рис. 8. Изотермы коэффициента растекания (1), поверхностного (2) и межфазного (3) натяжения водных растворов на границе с гептаном при различной концентрации пленкообразующего пенообразователя

роду K_{10} определяют по известному соотношению [15–17]:

$$K_{10} = \sigma_0 - (\sigma_{01} + \sigma_1), \quad (1)$$

где σ_0 — поверхностное натяжение гептана, мН/м;
 σ_{01} — межфазное поверхностное натяжение на границе *раствор – гептан*, мН/м;
 σ_1 — поверхностное натяжение водного раствора на границе с воздухом, мН/м.

Поверхностное натяжение раствора пленкообразующего пенообразователя на границе с воздухом составляет 16–19 мН/м, межфазное поверхностное натяжение — 1,0–6,0 мН/м. Чтобы обеспечить растекание капли по углеводородам, которые имеют $\sigma_0 = 22,3$ мН/м, необходимо иметь водный раствор с $\sigma_{01} = 17$ мН/м, а межфазное натяжение — $\sigma_{01} = 2,5$ мН/м.

Зависимость коэффициента растекания от концентрации пенообразователя необходима при использовании жесткой и морской воды. Как правило, наличие солей жесткости в воде приводит к снижению концентрации молекул ПАВ, которые связываются с ионами кальция и магния и выпадают в осадок. В связи с этим для компенсации потерь ПАВ в осадок необходимо знать влияние солей жесткости на концентрацию пенообразователя в рабочем растворе, если предполагается перед использованием хранить пенообразователь в виде рабочего раствора, например, в кольцевом растворопроводе.

На втором этапе определяют пенообразующую способность генераторов пены. В зарубежной практике используются высоконапорные генераторы пены, основное отличие которых от отечественных связано со способностью образовывать пену кратностью

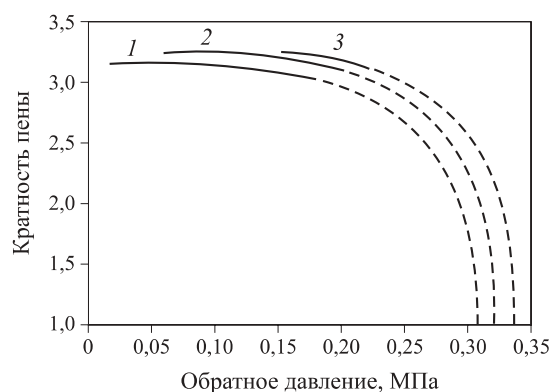


Рис. 9. Зависимость кратности пены от обратного давления при различном давлении раствора перед генератором [19]: 1 — 0,6 МПа; 2 — 0,7 МПа; 3 — 0,8 МПа

3,0–4,0 при наличии противодействия 1,5–2,0 атм. Эти генераторы разрабатывались для противопожарной защиты резервуаров высотой не более 12 м. Для обеспечения кратности пены более 3,5 конструкция генератора предусматривала эжекцию воздуха из расчета кратности пены 4,0. Учитывая, что приток воздуха в струю раствора определяется скоростью потока водного раствора, а кратность — соотношением расхода водного раствора и эжектируемого воздуха, расход раствора старались поддерживать минимальным. Давление раствора перед генератором пены, которая способна обеспечить пожарная автоцистерна, при расходе раствора 1,0 л/с составляло 8–10 атм. Такие параметры имели генераторы пены, использованные в натурных экспериментах.

Зарубежные высоконапорные генераторы характеризуются зависимостью кратности пены от противодействия со стороны резервуара. Типичная зависимость кратности от давления представлена на рис. 9 [19]. Кратность пены более 3,0 поддерживается только при противодействии не более 2,0 атм.

Для повышения интенсивности подачи пены использовали спаренные генераторы, что позволяло получить удвоенный расход пенообразующего раствора. На рис. 10 и 11 представлены фото спаренных генераторов пены с расходом 10 л/с каждый. Попытка обойтись одним генератором пены вместо двух или четырех привела к производству генераторов с расходом 20 и 40 л/с. Поскольку давление на входе в генератор оставалось неизменным (9 ± 1 атм), то повышение расхода было достигнуто за счет увеличения проходного сечения в узком месте генератора.

Таким образом, скорость потока и количество эжектируемого воздуха остались прежними. Кратность пены, естественно, снизилась и составляла менее 3,0. Как было показано в экспериментах, уменьшение кратности пены ниже 4,0 ведет к большим потерям и расслоению ее в процессе подъема на поверхность нефтепродукта. В результате фактическая



Рис. 10. Высоконапорные генераторы низкой производительности, соединенные попарно на один линейный ввод пены



Рис. 11. Схема стационарного соединения генераторов низкократной пены системы подслоного тушения пожара от передвижной пожарной техники

интенсивность подачи пены снижается в 3–4 раза. Соответственно, резко возрастает время тушения и удельный расход пенообразователя, необходимый для тушения пожара нефтепродукта в резервуаре.

С учетом особой важности кратности пены, полученной с помощью генераторов пены, ниже показана схема установки для испытания высоконапорных генераторов и измерения кратности пены (рис. 12 и 13). Эта схема была использована при испытании генераторов пены, которые применялись при полигонных огневых испытаниях системы подслоного тушения пожара в резервуаре объемом 5000 м³. Важным элементом установки является узел отбора и сбора пены. Если пену подавать в емкость с расстояния, например, 50 см, то в сосуд увлекается большой объем воздуха и, как следствие, кратность пены оказывается завышенной. Для предотвращения этой ошибки выход пробоотборника вводят в трубку, которая опущена на дно сосуда. В результате измерения дают правильную величину кратности пены.

Следует отметить, что качество генераторов пены первоначально определяли по количеству эжектируемого воздуха с использованием водопроводной



Рис. 12. Демонстрация узла отбора пены при испытании генератора на кратность пены: металлическая трубка опущена в емкость до уровня 3 см выше дна



Рис. 13. Демонстрация мерной емкости, заполненной анализируемой пеной, поданной в основание емкости во избежание захвата воздуха снаружи

воды. Если соотношение объемов воздуха и воды составляло не менее 4,0, то генераторы считались пригодными для дальнейших испытаний.

Третий этап — это транспортирование пены по трубопроводу. На выходе генератора воздух и раствор еще не образуют пену, а представляют собой неоднородную смесь жидкости и воздуха. Пена формируется в процессе продвижения по трубопроводу за счет трения неоднородной массы о его поверхность, поэтому важно, чтобы длина трубопровода составляла не менее 10 м. При протяженности трубопровода более 60 м пена, сформированная на первых 10 м, начнет расслаиваться: воздух будет подниматься вверх, а водная эмульсия будет продолжать двигаться вниз [19, 20]. Следовательно, оптимальная протяженность пенопровода должна составлять 15–50 м. Если пена одновременно подается в верхний пояс резервуара, то необходимо обеспечить давление, достаточное для организации напорного рассеяния пенной струи. В противном случае работа верхнего пояса пенных насадков окажется неэффективной. На рис. 14 представлена картина неэффек-



Рис. 14. Иллюстрация неравномерной работы системы подачи пены сверху в кольцевой зазор плавающей крыши резервуара: один слив подает пену слабой струей, а другой (красная труба) еще не работает (пена к нему не поступила)

тивной работы верхних пенных насадков системы пожаротушения.

В зарубежной практике генераторы пены располагаются в верхнем поясе резервуара, поэтому давления раствора, подаваемого к генератору, достаточно для получения плоской струи, которая концентрируется в кольцевом зазоре между плавающей крышей и стенкой резервуара.

На четвертом этапе осуществляется ввод струи пены в нефтепродукт. Чем выше линейная скорость пены после пенного насадка, тем глубже внедряется нефтепродукт в поток пены. Это особенно опасно, если коэффициент растекания водного раствора пенообразователя близок к нулю или имеет отрицательную величину. Захваченный нефтепродукт препятствует формированию изолирующего слоя пены.

Пятый этап — формирование на горячей поверхности изолирующего слоя пены и водной пленки. На этом этапе происходит обновление поверхностного слоя горячей жидкости холодным, который поднимается к поверхности вместе со всплывающей струей пены. При этом происходит несколько процессов:

- охлаждение поверхностного слоя, что ведет к снижению скорости выгорания;
- формирование локального подъема слоя нефтепродукта в месте выхода пены на поверхность;
- возбуждение поверхностного движения углеводорода к стенкам резервуара, что препятствует формированию изолирующего пенного слоя;
- термическое разрушение пены потоком тепла от факела пламени и от раскаленной стенки резервуара;
- образование на охлажденной поверхности горючей жидкости пленки водного раствора из разрушенной пены.



Рис. 15. Локальный участок над местом подъема пены на горящую поверхность нефти



Рис. 16. Иллюстрация изолирующего действия слоя пены после тушения пламени бензина, находящегося в цилиндре в центре противня с бензином

При тушении пламени часть поверхности нефтепродукта, которая остается непокрытой пеной, закрывается изолирующей пленкой (рис. 15). Со временем вся поверхность углеводорода окажется покрытой слоем пены, которая была захвачена нисходящими в процессе тушения потоками жидкости.

Отличительной особенностью пленкообразующих пенообразователей является возможность предотвращения повторного возгорания нефтепродукта после частичного разрушения пены. Изолирующее действие слоя пены после тушения бензина, которое характеризуется периодом предотвращения повторного возгорания, представлено на рис. 16. Время повторного возгорания составляет 10–15 мин. Этого достаточно, чтобы металлические элементы были охлаждены до температуры, которая позволит исключить повторное возгорание нефтепродукта.

Выводы

На основе анализа натурных огневых испытаний и сопоставления полученных в них результатов с модельными экспериментами выявлены оптимальные параметры системы процесса подслоного тушения пожаров нефти в резервуарах.

Установлено, что на огнетушащую эффективность подслоной системы влияют следующие факторы:

- снижение концентрации пенообразователя в процессе приготовления и хранения рабочего раствора пенообразователя, что отрицательно сказывается на возможности самопроизвольного растекания водного раствора по нефтепродукту;
- погрешность в дозировании концентрированного пенообразователя в процессе приготовления рабочего раствора;
- невозможность создания пены кратностью не менее 3,5 при использовании генераторов с расходом более 10 л/с и при давлении $(9 \pm 0,5)$ атм;
- применение генераторов пены с обратным клапаном на линии эжекции воздуха для создания давления, необходимого для открытия обратного клапана и разрыва предохранительной мембраны;
- отбор проб пены при работающем генераторе, что исключает захват воздуха падающей струей пены;

- использование пены кратностью ниже 4,0;
- поддержание оптимальной протяженности пенопровода для получения пены однородной структуры;
- применение распределенной схемы расположения пенных насадков для предотвращения образования локальных участков с увеличенным слоем нефти и снижения степени захвата пены нисходящими потоками нефти;
- обеспечение длительного периода до повторного возгорания нефтепродукта раскаленными стенками резервуара из-за утраты пеной изолирующего действия.

С учетом потерь пены в циркулирующем объеме нефти и дополнительного термического действия раскаленных металлических стенок верхнего пояса резервуара результаты модельных экспериментов удовлетворительно согласуются с натурными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White D. Make room for safety // *Industrial Fire World*. — 2006. — Vol. 21, No. 1. — P. 8–10.
2. Westwood K. D. Dark skies over England // *Industrial Fire World*. — 2006. — Vol. 21, No. 1. — P. 4–7.
3. Сучков В. П., Ралюк В. В. Анализ причин и последствий пожаров в резервуарных парках ТЭК и мер по их устранению // *Безопасность в нефтегазовом комплексе : материалы конференции*. — М., 2000. — С. 69.
4. Сучков В. П., Безродный И. Ф., Вязниковцев А. В., Гилетич А. Н., Молчанов В. П., Швырков А. Н. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1992. — 100 с.
5. Катаев А. Д. Фторсинтетические пленкообразующие пенообразователи Легкая вода производства компании 3М // *Состояние и перспективы развития противопожарной защиты объектов добычи, транспортировки, переработки нефти и газа : материалы Всероссийского совещания-семинара*. — Республика Татарстан, Альметьевск, 1997. — С. 57–63.
6. Шароварников А. Ф., Воевода С. С. Новые средства и способы тушения пожаров нефти и нефтепродуктов // *Состояние и перспективы развития противопожарной защиты объектов добычи, транспортировки, переработки нефти и газа : материалы Всероссийского совещания-семинара*. — Республика Татарстан, Альметьевск, 1997. — С. 41–47.
7. Шароварников А. Ф., Ефимов А. А. Подслоный способ тушения пожаров нефти и нефтепродуктов // *Пожарное дело*. — 1991. — № 12. — С. 91–96.
8. Шароварников А. Ф., Грашичев Н. К., Воевода С. С. Противопожарная защита резервуарных парков установками подслоного тушения // *Совершенствование деятельности органов Государственного пожарного надзора : сб. науч. тр.* — М. : ВПТШ, 1991. — С. 32–35.
9. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П. Подслоное тушение // *Пожарное дело*. — 1995. — № 1. — С. 83–85.
10. Накакуки А. Историческое изучение вопросов тушения пожаров в нефтяных резервуарах, оборудованных системой подачи под слой // *Хайкан гидзюцу кэнкю кёкайси (япон.)*. — 1981. — Vol. 21, No. 2. — P. 73–77.
11. Нуримото Н. Установки пожаротушения в нефтехранилищах путем введения пены под слой нефтепродукта // *Касай (япон.)*. — 1977. — Vol. 27, No. 3. — P. 11–19.
12. Zhang Shujing, Gu Xiujuan. Design and flow control of subsurface injection system for mobile oil tanks // *Proceedings of the 1st Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. — International Association for Fire Safety Science, 1992. URL: http://www.iafss.org/publications/aofst/1/348/view/aofst_1-348.pdf (дата обращения: 15.01.2016).
13. Кокорин В. В., Романова И. Н., Хафизов Ф. Ш. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего // *Нефтегазовое дело : электронный научный журнал*. — 2012. — № 3. — С. 255–260.

14. CPR 18E. Guidelines for quantitative risk assessment ("Purple book"). — Netherlands, Hague : Committee for the Prevention of Disasters. — 2005. — 237 p.
15. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Огнетушащая эффективность пены низкой кратности // Научное обозрение. — 2015. — № 8. — С. 114–120.
16. Дегаев Е. Н., Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Сравнительный анализ эффективности пенообразователей для тушения пожаров нефтепродуктов по структуре коэффициента растекания // Системы обеспечения техносферной безопасности : материалы Всероссийской конференции и школы для молодых ученых. — Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2015. — С. 13–15.
17. Макарова И. П., Дегаев Е. Н., Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Пленкообразующая способность водных растворов пенообразователей на поверхности нефтепродуктов // Системы обеспечения техносферной безопасности : материалы Всероссийской конференции и школы для молодых ученых. — Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2015. — С. 33–35.
18. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1344.
19. Plan B., McLaughlin Philip J., Smith James. Fire-fighting storage tanks // Fire Engineering. — 1988. — Vol. 141, No. 3. — P. 20–22, 24, 26–27.
20. Murphy R. F. Guidelines optimize foam fire fighting system // Oil and Gas Journal. — 1982. — No. 4. — P. 229–232.

Материал поступил в редакцию 22 января 2016 г.

Для цитирования: Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Факторы, снижающие огнетушащую эффективность подслоной системы при тушении пламени нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 4. — С. 56–67. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.56-67.

English

FACTORS WHICH REDUCE FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF SUBLAYER SYSTEM DURING SUPPRESSION OF THE FLAME OF OIL PRODUCTS

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)

SHAROVARNIKOV A. F., 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)

ABSTRACT

The special attention in analysis of the sublayer extinguishing process was paid to results of full-scale tests. Low efficiency of the sublayer fire extinguishing system can be caused by a number of neglects which are allowed in processes of preparation and extinguishing. It is related to the choice of foaming agent, method of preparation of working solution, method of producing and transportation of foam, method of injection of foam into oil product. Some results of full-scale tests of the sublayer system during extinguishing of fires in tanks with oil or oil products, which were conducted on testing grounds of such cities as Perm, Novopolotsk, Astrakhan and Almet'yevsk are presented in the article. It is also presented analysis of foreign information sources. On the basis of analysis of full-scale fire tests and comparison of obtained results, using model experiments, there were revealed the optimal

parameters of the sublayer system in process of extinguishing of fires in oil tanks. Factors leading to decrease of fire extinguishing efficiency of the sublayer system are considered. The conclusion is that fire extinguishing efficiency of the sublayer system is decreased due to such factors as decrease of foaming agent concentration during preparation and storage of working solution, that affects spontaneous spreading of aqueous solution on the surface of oil product; an error in dosing of concentrated foaming agent in process of preparation of working solution; impossibility to obtain the foam with expansion rate not less than 3.5 using generators with consumption rate of more than 10 l/s and pressure (9 ± 0.5) atm; application of foam generators with back pressure valve placed on air ejection line for creation the pressure necessary to open the valve and to rupture safety membrane; absence of a foam sampling procedure, while generator is working, which exclude capture of air by falling stream of foam; application of foam with expansion rate lower than 4.0; maintaining of optimal length of a foam line to obtain the foam with homogeneous structure; application of distributed scheme of foam nozzles location to prevent formation of local areas with raised layer of oil and to decrease the capture degree of foam by descending oil streams; providing the long period before burnback of oil product by heated tank walls due to loss of foam insulating properties.

Keywords: fire extinguishing efficiency; sublayer fire extinguishing system; full-scale fire tests; foam generator; foam expansion rate; optimal parameters of fire extinguishing system.

REFERENCES

1. White D. Make room for safety. *Industrial Fire World*, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 8–10.
2. Westwood K. D. Dark skies over England. *Industrial Fire World*, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 4–7.
3. Suchkov V. P., Ralyuk V. V. Analiz prichin i posledstviy pozharov v rezervuarnykh parkakh TEK i mer po ikh ustraneniyu [The analysis of reasons and consequences of fires in tank batteries of the FPS (fuel-and-power sector) and measures for their elimination]. *Bezopasnost v neftegazovom komplekse: materialy konferentsii* [Safety in a fuel-and-power sector. Proceedings of conference]. Moscow, 2000, p. 69.
4. Suchkov V. P., Bezrodnyy I. F., Vyaznikovtsev A. B., Giletich A. N., Molchanov V. P., Shvyrkov A. N. *Pozhary rezervuarov s neftyu i nefteproduktami* [Fires in tanks with oil and oil products]. Moscow, TsNIITNeftekhim Publ., 1992. 100 p.
5. Kataev A. D. Ftorsinteticheskiye plenkoobrazuyushchiye penoobrazovateli “Legkaya voda” proizvodstva kompanii 3M [Aqueous film forming foaming agents “Light water” produced by 3M company]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya protivopozharnoy zashchity obyektov dobychi, transportirovki, pererabotki nefi i gaza: materialy Vserossiyskogo soveshchaniya-seminara* [State and prospects of development of fire-prevention protection of objects of production, transportation and refining of oil and gas. Proceedings of All-Russian meeting-seminar]. Republic of Tatarstan, Almetyevsk, 1997, pp. 57–63.
6. Sharovarnikov A. F., Voevoda S. S. Novyye sredstva i sposoby tusheniya pozharov nefi i nefteproduktov [New means and ways of extinguishing of fires of oil and oil products]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya protivopozharnoy zashchity obyektov dobychi, transportirovki, pererabotki nefi i gaza: materialy Vserossiyskogo soveshchaniya-seminara* [State and prospects of development of fire-prevention protection of objects of production, transportation and refining of oil and gas. Proceedings of All-Russian meeting-seminar]. Republic of Tatarstan, Almetyevsk, 1997, pp. 41–47.
7. Sharovarnikov A. F., Efimov A. A. Podslonnyy sposob tusheniya pozharov nefi i nefteproduktov [Sublayer method of extinguishing of oil and oil product fires]. *Pozharnoye delo — Fire Business*, 1991, no. 12, pp. 91–96.
8. Sharovarnikov A. F., Grashichev N. K., Voevoda S. S. Protivopozharnaya zashchita rezervuarnykh parkov ustanovkami podslonnogo tusheniya [Fire protection of tank batteries by installations of sublayer extinguishing]. *Sovershenstvovaniye deyatelnosti organov Gosudarstvennogo pozhnogo nadzora: sb. nauch. tr.* [Improvement of activity of the State fire supervision bodies. Collection of scientific papers]. Moscow, Higher Fire and Technical School of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation Publ., 1991, pp. 32–35.
9. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P. Podslonnoye tusheniye [Sublayer extinguishing]. *Pozharnoye delo — Fire Business*, 1995, no. 1, pp. 83–85.

10. Nakakuki A. Istoricheskoye izucheniye voprosov tusheniya pozharov v neftyanykh rezervuarakh, oborudovannykh sistemoy podachi pod sloy [Historical study of problems of extinguishing of fires in oil tanks equipped with system of sublayer supply]. *Haykan Gidzyutsu Kenkyu Kekaysi* (Japan), 1981, vol. 21, no. 2, pp. 73–77.
11. Nurimoto N. Ustanovki pozharotusheniya v neftekhranilishchakh putem vvedeniya peny pod sloy nefteprodukta [Fire extinguishing installations for oil storages injecting foam under the layer of oil product]. *Kasay* (Japan), 1977, vol. 27, no. 3, pp. 11–19.
12. Zhang Shujing, Gu Xiujuan. Design and flow control of subsurface injection system for mobile oil tanks. *Proceedings of the 1st Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. International Association for Fire Safety Science, 1992. Available at: http://www.iafss.org/publications/aofst/1/348/view/aofst_1-348.pdf (Accessed 15 January 2016).
13. Kokorin V. V., Romanova I. N., Khafizov F. Sh. Problemy effektivnogo tusheniya pozharov vertikalnykh stalnykh rezervuarov v sloy goryuchego [The problems of effective fire suppression of vertical steel storage tanks in the fuel layer]. *Neftegazovoye delo. Elektronnyy nauchnyy zhurnal — Oil and Gas Business. Electronic Scientific Journal*, 2012, no. 3, pp. 255–260.
14. *CPR 18E. Guidelines for quantitative risk assessment (“Purple book”)*. Netherlands, Hague, Committee for the Prevention of Disasters, 2005, p. 237.
15. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Ognetchashchaya effektivnost peny nizkoy kratnosti [Fire extinguishing effectiveness of low multiplicity foam]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2015, no. 8, pp. 114–120.
16. Degaev E. N., Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Sravnitelnyy analiz effektivnosti penoobrazovateley dlya tusheniya pozharov nefteproduktov po strukture koeffitsiyenta rastekaniya [The comparative analysis of efficiency of foaming agents for extinguishing of fires of oil products taking into account the structure of spreading coefficient]. *Sistemy obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy Vserossiyskoy konferentsii i shkoly dlya molodykh uchenykh* [Systems of Providing of the Technosphere Safety. Proceedings of All-Russian Conference and School for Young Scientists]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2015, pp. 13–15.
17. Makarova I. P., Degaev E. N., Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Plenkoobrazuyushchaya sposobnost vodnykh rastvorov penoobrazovateley na poverkhnosti nefteproduktov [Film forming ability of aqueous solutions of foaming agents on a surface of oil products]. *Sistemy obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy Vserossiyskoy konferentsii i shkoly dlya molodykh uchenykh* [Systems of Providing of the Technosphere Safety. Proceedings of All-Russian Conference and School for Young Scientists]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2015, pp. 33–35.
18. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1344.
19. Plan B., McLaughlin Philip J., Smith James. Fire-fighting storage tanks. *Fire Engineering*, 1988, vol. 141, no. 3, pp. 20–22, 24, 26–27.
20. Murphy R. F. Guidelines optimize foam fire fighting system. *Oil and Gas Journal*, 1982, no. 4, pp. 229–232.

For citation: Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Faktory, snizhayushchiye ognetchashchuyu effektivnost podsloynoy sistemy pri tushenii plameni nefteproduktov [Factors which reduce fire extinguishing efficiency of sublayer system during suppression of the flame of oil products]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 56–67. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.56-67.