

УДК 614.842.615

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПОДСЛОЙНОГО СПОСОБА****С.М. МАЛАШЕНКО***(Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь, Минск);**канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО**(Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск)*

Демонстрируется разработанный авторами способ подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом для вертикальных стальных резервуаров объемом 500...5000 тонн, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами. Разработана математическая модель и метод имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены при подслоном тушении резервуаров, позволяющий исследовать данный процесс с учетом реально существующего дрейфа параметров тушения и прогнозировать время тушения. Разработана методика выбора режимных параметров тушения. Определены значения режимных параметров тушения, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения для резервуара емкостью 2000 тонн, заполненного бензином.

Ключевые слова: резервуар, пожар, воздушно-механическая огнетушащая пена, подслоный способ тушения нефти и нефтепродуктов, время тушения, математическая модель.

Хранение нефти и нефтепродуктов осуществляется на специализированных предприятиях – нефтехранилищах – в специальных емкостях, резервуарах. Благодаря своим конструктивным особенностям топливные резервуары являются наиболее эффективным из них для хранения как темных, так и светлых нефтепродуктов или нефти. Применяются резервуары металлические, железобетонные, из синтетических материалов [1]. Наиболее распространенными являются цилиндрические емкости. Так, например, на сегодняшний день в России насчитывается парк резервуаров для нефтепродуктов общей емкостью около 100 млн. тонн [2].

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в обеспечении пожарной безопасности, на интенсивную разработку и применение комплекса мер по предотвращению и ликвидации пожаров, проблемы защиты резервуаров остаются нерешенными, о чем свидетельствуют происходящие за рубежом и в странах СНГ пожары, наносящие огромный ущерб действующим предприятиям.

Так, например, на нефтеперерабатывающем заводе «Коноко» в северной Англии в 2001 году произошел сильный взрыв, после которого территорию предприятия охватил обширный пожар. На тушении пожара были задействованы 15 расчетов пожарной охраны, но пожар удалось локализовать лишь спустя 8 часов, а 80 пожарных все еще продолжали борьбу с огнем [3].

На севере Японии в 2002 году возник сильный пожар на крупном нефтеперерабатывающем предприятии. Завод одной из крупнейших японских нефтяных компаний «Idemitsu», расположенный на острове Хоккайдо, ежедневно перерабатывает около 140 000 баррелей нефти. Огонь охватил резервуар с нефтью и вскоре перекинулся на соседние строения, но через два с половиной часа распространение огня удалось взять под контроль. В тушении участвовали 15 пожарных расчетов.

В 2003 году в резервуаре с 20 м³ бензина на нефтеперерабатывающем заводе в Гданьске вспыхнул пожар, погибли 3 сотрудника завода, которые проверяли качество бензина в резервуаре. Пожар был ликвидирован на следующий день. Потушить огонь удалось благодаря «пенной атаке» на горящий резервуар. В тушении огня были задействованы 32 пенные пушки, каждая из которых одновременно могла подавать от 1600 до 5000 л пены.

В декабре 2005 года произошло три взрыва с последующим горением на нефтехранилище Bansfield, расположенном к северу от Лондона. Bansfield – пятое по величине нефтехранилище Великобритании, в котором содержится до 5% всех нефтепродуктов страны. Более 60 часов продолжалась борьба с огнем в 20 основных резервуарах с топливом.

В марте 2009 года в Мозыре (Беларусь) на территории парка светлых нефтепродуктов ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» концерна «Белнефтехим» произошел пожар в стальном резервуаре объемом 10 тыс. куб. метров для хранения бензина. В резервуаре находилось 3 тыс. литров бензина марки АИ-92. Тушение продолжалось более суток [2].

Основная часть. Приведенные факты свидетельствуют о том, что тушение пожаров в резервуарах подачей пены на горящую поверхность является продолжительным и затратным. При этом экономические потери растут каждую минуту за счет выгорания нефтепродукта и расхода огнетушащих средств.

Задача минимизации времени тушения является актуальной как с точки зрения материальных затрат, так и с точки зрения обеспечения безопасности пожарных расчетов, участвующих в тушении. Усовершенствование и доработка уже существующей технологии *подслоного тушения пожаров* сможет решить упомянутую выше задачу и сделать производственные объекты безопаснее.

Основные преимущества подслоного тушения состоят в следующем. Оперативность тушения пожара в резервуаре обеспечивается образованием на поверхности воспламенившегося продукта негорючей пленки. Пленка характеризуется способностью к самозатягиванию и образуется из всплывших на поверхность мелких пузырьков пены. В результате пленка перекрывает доступ кислорода к месту пожара.

Поскольку пена подается в нижний холодный слой продукта в резервуаре, эффективность подслоного тушения не зависит от времени развития пожара.

Подслоное тушение обеспечивает резкое снижение температуры воспламенившегося продукта в резервуарах и не теряет эффективности даже при нарушении конструкции резервуара вследствие пожара (сварачивании стенки, обрушении крыши, деформации понтона).

Разработано устройство оперативной врезки (рис. 1) и способ подачи огнетушащих растворов в резервуар с горящим слоем легковоспламеняющейся жидкости, не оборудованный стационарно смонтированным пенопроводом для тушения. Устройство оперативной врезки интегрированное (УОВИ) предназначено для выполнения отверстий в технологических коммуникациях и последующей подачи огнетушащей воздушно-механической пены низкой кратности. Привод УОВИ – пневматический. Режущий инструмент – корончатая фреза диаметром 80 мм с твердосплавными пластинами. Подача/отвод фрезы – производится вручную. На устройство оперативной врезки получен патент Республики Беларусь [4].

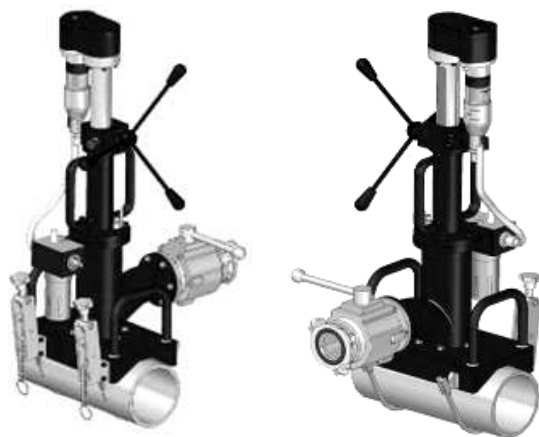
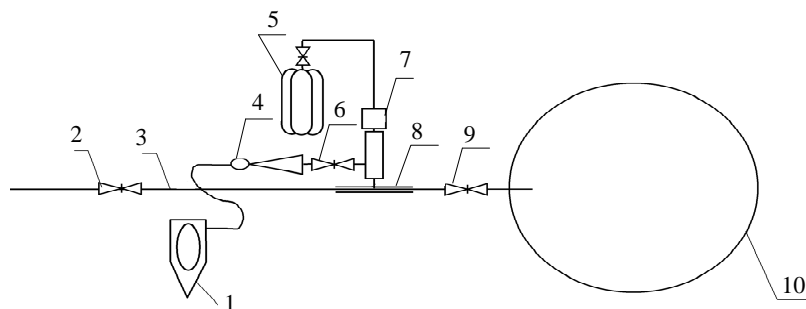


Рисунок 1. – Устройство оперативной врезки интегрированное

На рисунке 2 приведена принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод с помощью УОВИ.



- 1 – пожарный аварийно-спасательный автомобиль; 2, 6, 9 – шаровой кран (задвижка);
3 – действующий продуктопровод; 4 – высоконапорный генератор пены;
5 – источник сжатого воздуха; 7 – устройство врезки; 8 – бандаж; 10 – резервуар

Рисунок 2. – Принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод

Устройство врезки монтируют на действующий трубопровод. На входном патрубке устройства врезки устанавливают высоконапорный генератор пены. Прокладывают рукавную линию от пожарно-

го аварийно-спасательного автомобиля к высоконапорному генератору пены. Осуществляют врезку в действующий трубопровод. По окончании врезки открывают задвижку и от пожарного аварийно-спасательного автомобиля через высоконапорный генератор подают воздушно-механическую огнетушащую пену в резервуар.

Для разработанного устройства и способа актуальной задачей является определение оптимальных условий подачи пены к месту горения, что требует разработки модели, описывающей гидродинамику пены.

Время тушения при реализации способа подслоного тушения может быть формально разделено на три этапа: время движения пены в технологическом трубопроводе; подъем пены в резервуаре; растекание по поверхности нефтепродукта до полного ее покрытия и прекращения горения.

Время прохождения пены по технологическому трубопроводу до выхода в резервуар определяется скоростью ее движения, значением расхода, то есть характеристиками оборудования. При расчете времени подъема пены нас интересует время достижения поверхности нефтепродукта первой порцией пены, то есть момент начала процесса растекания ее по поверхности. Затем процессы подъема пены в резервуаре и растекания по поверхности идут параллельно и одновременно. Время растекания пены по поверхности горения описано выражением, приведенным в трудах А.Ф. Шароварникова [5]. Таким образом, суммируя время движения огнетушащей пены на всех трех этапах – движение по трубопроводу от места врезки до резервуара, подъем в резервуаре и растекание по поверхности нефтепродукта – получим полное время тушения. Суммарное время является основным критерием эффективности тушения.

Разработанная математическая модель описывает движение пены на трех этапах и связывает между собой характеристики процесса подслоного тушения, свойства нефтепродукта, внешние влияющие факторы, принятые за параметры, и время тушения как важнейший показатель эффективности процесса, принятый за критерий [6]. Такая модель позволяет рассчитывать время тушения.

Однако при выполнении расчетов на базе детерминированных моделей реально существующее явление разброса параметров не принимается во внимание. Это приводит к несоответствию расчетных и фактических выходных показателей процесса. Более эффективно решать такие задачи позволяют вероятностные методы расчета. Для этого построено девятимерное пространство параметров, учитывающее возможное изменение параметров при тушении.

Моделирование в полном пространстве параметров проведено путем зондирования пространства параметров пробными точками. Для заполнения девятимерного пространства параметров выбрано 2048 зондирующих точек, каждая из которых описывает состояние системы по девяти параметрам и трем критериям. Критерии являются взаимно независимыми величинами, однако в математические выражения для критериев входят одни и те же параметры. Для каждой точки (сочетания параметров) рассчитаны значения критериев.

Анализ значений критериев показывает, что время прохождения пены по трубопроводу изменяется в диапазоне от 0,57 до 2,55 с, что составляет 1...3% от суммарного времени движения пены, и весь полученный ряд значений данного критерия является допустимым для принятой при расчете длины трубопровода.

При увеличении расстояния от врезки до резервуара это время будет увеличиваться, достигая в среднем 5...8 с при врезке на расстоянии до 50 м от резервуара. Такая ситуация может сложиться при невозможности нормативного (сразу за обвалованием) расположения врезки, например, при позднем обнаружении пожара, совпадении направления ветра с направлением технологического трубопровода либо при частичном обрушении резервуара.

Расчетное время подъема пены в резервуаре составило 5,7... 25,0 с. При расчете учтено изменение плотности нефтепродукта, изменение диаметра струи пены при подъеме в резервуаре, изменение кратности пены и расхода раствора через пеногенератор. При натурном эксперименте на резервуаре РВС-2000, расположенном на территории ОАО «Нафтан», проведена апробация подслоного способа тушения с помощью устройства оперативной врезки и получено суммарное значение времени, включающее в себя время прохождения пены через трубопровод и время подъема пены в резервуаре. При выполнении эксперимента на резервуаре невозможно отделить время нахождения пены в трубопроводе. Суммарное среднее время (по данным эксперимента) составляет около 30 с, что соответствует значению, полученному при моделировании.

При изменении температуры окружающего воздуха изменяется плотность и вязкость нефтепродукта. Это изменение, судя по аналитическим формулам, описывающим движение пены на различных этапах, может повлиять на скорость подъема пены, а следовательно и на время подъема пены в резервуаре. Однако диапазон изменения плотности топлива, введенный в модель, полностью охватывает значения плотности бензина при температурах от -40 до $+40$ °С. В работах, посвященных исследованию свойств нефтепродуктов, и в нормативных документах на их производство плотности бензинов, дизельных топлив, керосинов и т.д. не приводятся в детерминированных значениях для каждой марки, а указан

диапазон, в котором допустимо изменение плотности [7]. При моделировании не выявлено существенного влияния данного параметра на временные критерии.

Далее был определен диапазон изменения критерия «время растекания пены по поверхности нефтепродукта». Изменяемые параметры: расход огнетушащего средства, кратность пены, коэффициент гидросопротивления и др. При моделировании получены следующие значения этого критерия 9,7–239,0 с. Максимальное время растекания получено при самом неблагоприятном сочетании параметров тушения. Полученные значения критериев сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Разброс значений критериев

Критерий	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с
Время движения пены по трубопроводу	0,57	2,55
Время подъема пены в резервуаре	5,7	25,0
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	9,7	239,0

Чтобы обеспечить наибольшую эффективность тушения, необходимо минимизировать время. Это сделано путем введения ограничений на критерии и решения обратной задачи (определения оптимальных параметров) в ограниченном пространстве критериев.

На критерии наложены следующие ограничения (табл. 2):

- в 10%-ном диапазоне от минимальных значений критериев;
- в 25%-ном диапазоне от минимальных значений критериев;
- в 50%-ном диапазоне от минимальных значений критериев.

Значения критериев с учетом ограничений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Ограничения на критерии

Критерий	10%-ный диапазон	25%-ный диапазон	50%-ный диапазон
Время движения пены по трубопроводу	0,57...0,77	0,57...1,07	0,57...1,56
Время подъема пены в резервуаре	5,7...7,63	5,7...10,52	5,7...15,35
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	9,7...32,63	9,7...67,03	9,7...124,35

Анализ результатов моделирования в приведенных диапазонах критериев показывает, что первый (10%-ный) и второй (25%-ный) диапазоны не имеют практического значения, так как суммарное время тушения от 15,97 до 78,62 с может быть достигнуто при неоправданно большом расходе огнетушащего средства, высокой интенсивности подачи пены и пенном слое на поверхности нефтепродукта от 100 мм. Наиболее рациональным является третий диапазон. Однако в него были внесены коррективы, продиктованные следующими соображениями. Влияние времени прохождения пены через технологический трубопровод до резервуара при штатном расстоянии врезки по сравнению с другими критериями незначительно, диапазон изменения этого критерия до 1 с допустим. Процесс подъема пены в резервуаре наименее изучен, однако рассчитанное по предложенной математической модели время оказалось близким к экспериментальному (около 25 с). Для уменьшения общего времени тушения примем в качестве допустимого время подъема пены до 20 с.

Таким образом, определяем параметры подслоного тушения при следующих ограничениях на критерии:

- время движения пены в трубопроводе – до 1 с;
- время подъема пены в резервуаре – до 20 с;
- время растекания пены по поверхности – до 35 с.

При моделировании в ограниченном пространстве критериев установлено, что необходимо поддерживать значения управляемых параметров следующими:

- плотность пены – 237,8 кг/м³, то есть кратность 4,2 (допустимый разброс 3,7...4,6);
- расход пены 20,18 л/с (допустимый разброс 18,5... 21,3 л/с);
- оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения 54 мм (допустимый разброс 41... 62 мм).

Данные значения управляемых параметров обеспечивают заданное время тушения с вероятностью 99,9% при учете разброса остальных параметров.

Заключение. Разработан способ подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом для вертикальных стальных резервуаров

объемом 500...5000 т, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами при хранении нефтепродуктов с плотностью до 800 кг/м³.

Разработан метод имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены при подслоном тушении резервуаров, позволяющий исследовать данный процесс с учетом реально существующего дрейфа параметров тушения и прогнозировать время тушения.

Разработана методика выбора режимных параметров тушения и определены значения параметров, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения для резервуара емкостью 2000 тонн, заполненного бензином.

Разработанный метод имитационного моделирования может быть использован при определении времени тушения для резервуаров разного объема, при хранении различных топлив, изменяющейся степени заполнения резервуара, температуре окружающего воздуха и времени свободного горения до начала тушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Склады нефти и нефтепродуктов : СНБ 3.02.01-98. – Введ. 01.01.1999. – Минск : Минстройархитектура, 1998. – 46 с.
2. Кокорин, В.В. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего / В.В. Кокорин, И.Н. Романова, Ф.Ш. Хафизов // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3.
3. Описание пожара, произошедшего на нефтеперерабатывающем заводе «Коноко» в северной Англии 16.04.2001 [Электронный ресурс] / BBC World Service. – Режим доступа: http://news.bbc.co.uk/hi/russian/uk/newsid_1280000/1280560.stm. – Дата доступа: 20.03.2013.
4. Устройство оперативной врезки интегрированное : пат. 8559 Респ. Беларусь, МПК А 62 С 31/00 / В.К. Емельянов, В.М. Карач, О.В. Черневич, О.Д. Навроцкий, С.М. Малашенко ; заявитель Учреж. «НИИ пож. безоп. и проб. ЧС МЧС Респ. Беларусь». – и 20110944 ; заявл. 23.11.2011 ; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 183.
5. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников [и др.]. – М. : Изд-во «Пожнаука», 2005. – 448 с.
6. Малашенко, С.М. Математическая модель движения пены при подслоном тушении нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. тр. двенадцатой междунар. науч.-техн. конф., Курск, 19–20 марта 2015 г. / Юго-Западный гос. ун-т ; редкол. : С.Г. Емельянов [и др.]. – Курск, 2015. – С. 27–31.
7. Гуреев, А.А. Применение автомобильных бензинов / А.А. Гуреев. – М. : Химия, 1972. – 368 с.

Поступила 18.02.2016

PREDICTION TIME FIGHTING TANKS WHEN APPLYING THE SUBSURFACE METHOD

S. MALASHENKO, O. SMILOVENKO

The subsurface extinguishing method using the operative cut-in integrated device in the industrial pipeline tank with oil products for vertical steel tanks with a capacity of 500...5000 tons, not equipped with fixed mounted foam wires was developed. The mathematical model and computer simulation method of the foam motion during subsurface extinguishing of tanks, which allows to investigate this process taking into account the actually existing drift of the extinguishing parameters and to predict extinguishing time, was developed. The method of selection of operating extinguishing parameters was developed. The values of operating extinguishing parameters, providing specified time indicators (criteria) of the extinguishing tank with a capacity of 2000 tons, filled with gasoline were defined.

Keywords: tank, fire, air and mechanical fire-extinguishing foam, subsurface extinguishing method of oil and oil products, extinguishing time, mathematical model.