

## **ОПАСНОСТЬ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*Представлены результаты численного моделирования горения бензина в резервуаре для определения полей температуры и интенсивности теплового излучения с учётом ветрового воздействия в программном комплексе ANSYS Fluent. Полученные результаты могут использоваться для нахождения времени прогрева конструкций резервуара, расположенного рядом с горящим, до температуры самовоспламенения паров нефтепродукта.*

*Ключевые слова: резервуар вертикальный стальной, пожар, численное моделирование, интенсивность теплового излучения.*

## **S.A. Shvyrkov, V.V. Vorobyev, R.K. Ibatulin THE DANGER OF A CASCADING FIRE SPREADING IN A TANK FARM WITH A WIND EFFECT**

*The results of numerical simulation of gasoline combustion in the reservoir for determining the fields of temperature and intensity of thermal radiation, taking into account the wind effect in the ANSYS Fluent software package, are presented. The obtained results can be used to find the time for heating the tank structures located next to the burning oil vapor to the autoignition temperature of the petroleum product vapor.*

*Key words: tank, fire, numerical simulation, intensity of thermal radiation.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 июля 2017 г.

Основным строительным сооружением, предназначенным для приёма, хранения, подготовки, учёта и выдачи нефти и нефтепродуктов, является **вертикальный цилиндрический стальной резервуар (РВС)**. Группа (группы) РВС, размещённых на территории, ограниченной по периметру обвалованием или ограждающей стеной, образует резервуарный парк.

Противопожарные расстояния между стенками РВС, располагаемых в одной группе, принимаются в соответствии с требованиями [1]. Так, для РВС со стационарной крышей и единичным номинальным объёмом до 50 тыс. м<sup>3</sup> минимальное расстояние между резервуарами составляет 0,75  $D_p$  (здесь  $D_p$  – наружный диаметр РВС).

Из практики тушения пожаров в РВС известно, что они характеризуются сложными процессами развития, как правило, носят затяжной характер и требуют привлечения большого количества сил и средств для их ликвидации. При возникновении пожара на одном из РВС возможно каскадное распространение пожара в резервуарном парке [2, 3]. Ниже представлен характерный пример пожара, развивавшегося по такому сценарию.

8 июня 2015 г. на нефтебазе, расположенной в Васильковском районе Киевской области Украины, произошёл пожар. Нефтебаза принадлежит ООО "Бытремстройматериалы" и входит в национальную украинскую сеть автоза-

правочных комплексов "БРСМ-Нафта". Общий объём хранимых на нефтебазе нефтепродуктов на момент начала пожара, по разным оценкам, составлял до 14 тыс. тонн [4].

Сигнал о возгорании на нефтебазе поступил на пульт дежурного 8 июня в 17 ч. 29 мин. по местному времени. Пожар начался в РВС, в котором находилось около 800 м<sup>3</sup> нефтепродукта. Позже, в результате воздействия теплового излучения, пожар распространился на два соседних РВС, а к 22 ч. перекинулся ещё на один (рис. 1).



**Рис. 1.** Фрагмент распространения пожара в резервуарном парке нефтебазы ООО "Бытремстройматериалы" [4]

Прибывшие к месту пожара сотрудники пожарной охраны обнаружили четверых пострадавших работников нефтебазы, которые пытались потушить пожар самостоятельно. Все пострадавшие были госпитализированы, один из них был направлен в реанимацию. Тушение пожара продолжалось всю ночь, но к утру 9 июня локализовать пожар так и не удалось. В некоторых местах огонь перекинулся на близлежащий лесной массив, но был потушен. Днём 9 июня началась эвакуация местных жителей из двухкилометровой зоны от места пожара.

По состоянию на 10 июня в ликвидации пожара принимали участие более 300 человек, 60 единиц пожарной и специальной техники, 5 пожарных поездов, а также пожарные танки. Пожарным удалось провести пенную атаку с помощью пожарных танков и ликвидировать горение в трех РВС. Однако к этому времени еще 17 РВС находились в аварийном состоянии, 14 из которых были так или иначе разрушены, а остальные продолжали гореть.

К утру 11 июня пожарным оставалось ликвидировать горение в последнем РВС с нефтепродуктом, но в 10 ч. 15 мин. произошли взрывы в двух находившихся рядом резервуарах, и огонь вновь усилился, после чего взрывы в этих РВС происходили ещё несколько раз.

14 июня интенсивность горения удалось снизить, что позволило осуществить перекачку оставшихся в РВС нефтепродуктов в резервуары, расположенные на соседней нефтебазе. Кроме этого, на территорию нефтебазы завезли более 5 тонн сорбентов, чтобы очистить почву от нефтепродуктов. 16 июня пожар был полностью ликвидирован. В результате пожара погибло 6 и пострадало более 15 человек.

Таким образом, изучение процессов горения нефти и нефтепродуктов в РВС с целью предотвращения возможности каскадного развития пожара в резервуарном парке остаётся актуальной задачей.

Известно, что пожар в РВС в большинстве случаев начинается со взрыва паровоздушной смеси. Взрыв в РВС приводит к подрыву (реже срыву) крыши с последующим горением на всей поверхности горючей жидкости. Далее происходит прогрев жидкости преимущественно тепловым излучением пламени, а также испарение и последующее горение паров нефтепродукта. При таком пожаре над РВС с горящей жидкостью образуется естественно-конвективное пламя [2, 3].

Процессы горения, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которое учесть в рамках упрощённых аналитических и эмпирических соотношений крайне сложно. Это определяет необходимость использования для решения таких задач методов численного моделирования на основе пакетов вычислительной гидродинамики (CFD-пакеты). При таком моделировании сложная взаимосвязь тепло- и массообменных процессов, сопровождающих развитие пожара, учитывается посредством совместного решения дифференциальных уравнений переноса массы, импульса, энергии и турбулентных характеристик.

Для численного моделирования пожара в РВС применялся программный комплекс *ANSYS Fluent*, позволяющий построить геометрическую модель, выполнить дискретизацию расчётной области, выбрать необходимые физические модели, задать начальные и граничные условия, произвести решение и проанализировать полученные результаты.

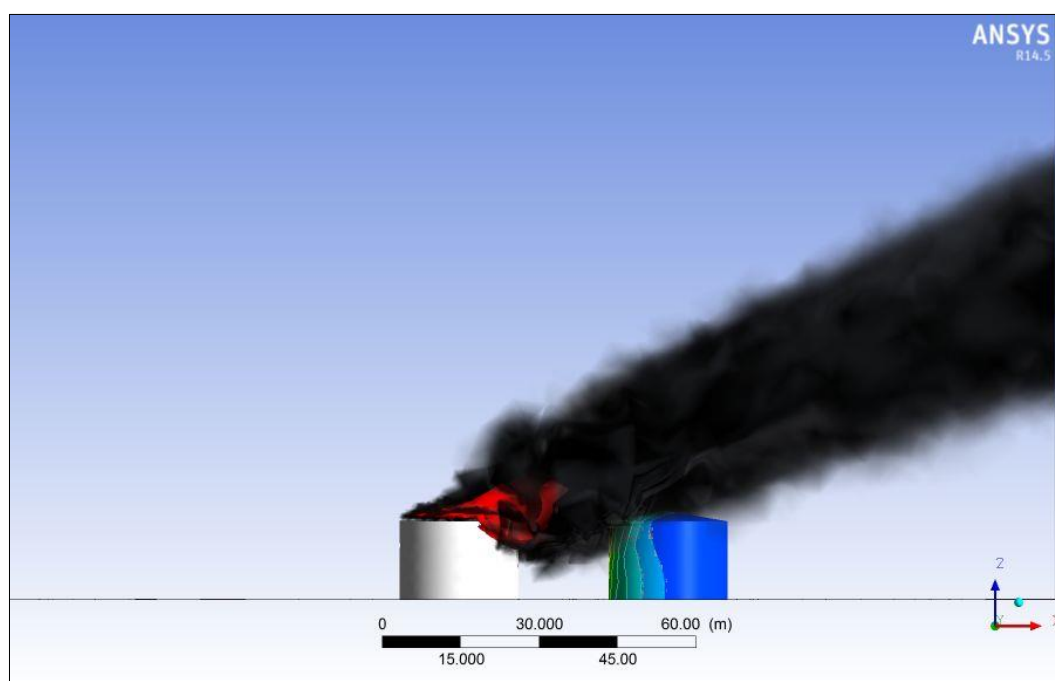
Объектом для численного моделирования пожара был выбран РВС-5000 м<sup>3</sup> в натуральную величину. Задача решалась в стационарной постановке с использованием модели турбулентности *k-ε (Realizable)*, модели горения *Eddy Dissipation*, модели излучения *Discrete Ordinates* и модели образования сажи *Moss-Brookes* [5]. На входе в расчётную область задавался гомогенный поток паров бензина с осредненной температурой кипения и удельным расходом, равным удельной массовой скорости выгорания топлива [6]. При моделировании учитывалось влияние бокового ветра, так как отклонение пламени от вертикали существенно влияет на поля температуры и интенсивности теплового излучения.

Ниже представлены результаты численного моделирования изучаемого явления в виде полей температуры и падающей интенсивности теплового излучения, а также графиков зависимостей угла отклонения и длины пламени от скорости ветра. Так, на рис. 2 и 3 показано сравнение контуров пламени

и дыма от пожара в РВС при численном моделировании с аналогичными параметрами пожара в РВС-5000 м<sup>3</sup>, произошедшего в резервуарном парке Территориального производственного предприятия (ТПП) "ЛУКОЙЛ-УсинскНефтегаз" 22 мая 2014 г. [7].

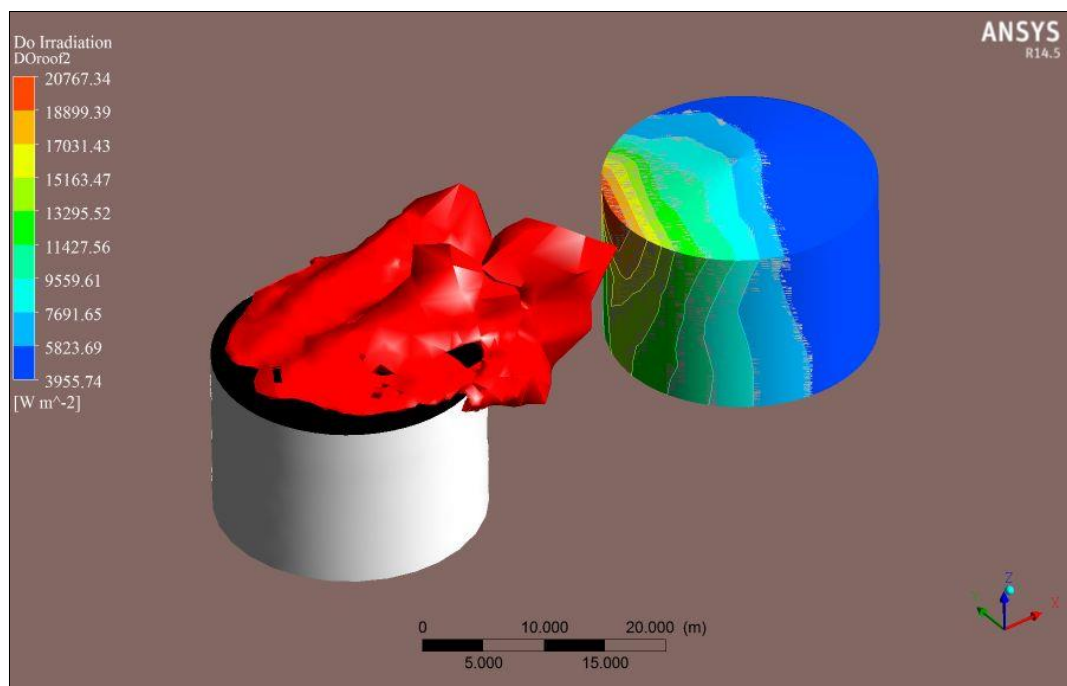


**Рис. 2.** Фрагмент пожара в РВС-5000 м<sup>3</sup>  
на территории ТПП "ЛУКОЙЛ-УсинскНефтегаз"



**Рис. 3.** Изоповерхности температуры, массовой доли сажи  
и распределение интенсивности теплового излучения  
на горящем резервуаре при скорости ветра 8 м/с

Контур светящейся зоны пламени, изображённый на рис. 4, идентифицирован по изоповерхности с температурной  $850\text{ }^{\circ}\text{K}$  [8].



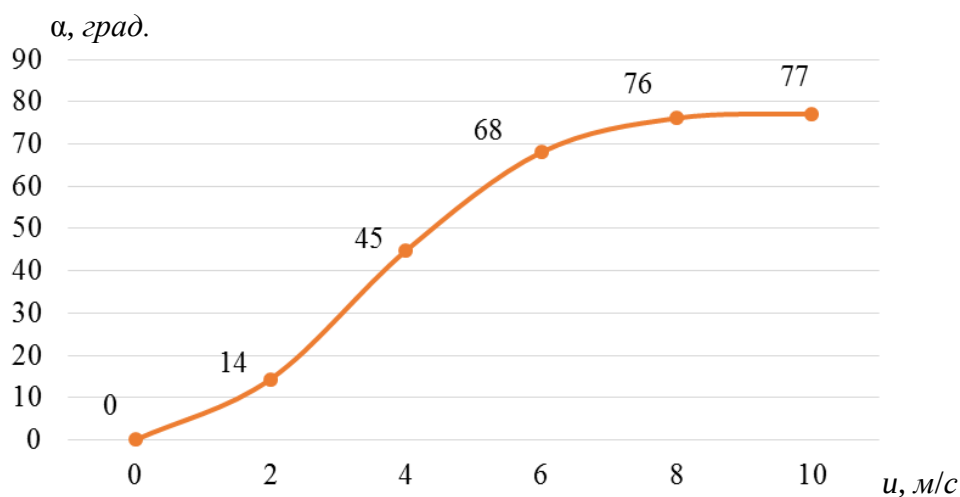
**Рис. 4.** Изоповерхность температуры и распределение интенсивности теплового излучения на негорящем резервуаре при скорости ветра  $8\text{ м/с}$

Необходимо отметить, что максимальное значение интенсивности теплового излучения, падающего с горящего РВС на соседний, наблюдается в месте сопряжения вертикальной стенки РВС и его крыши.

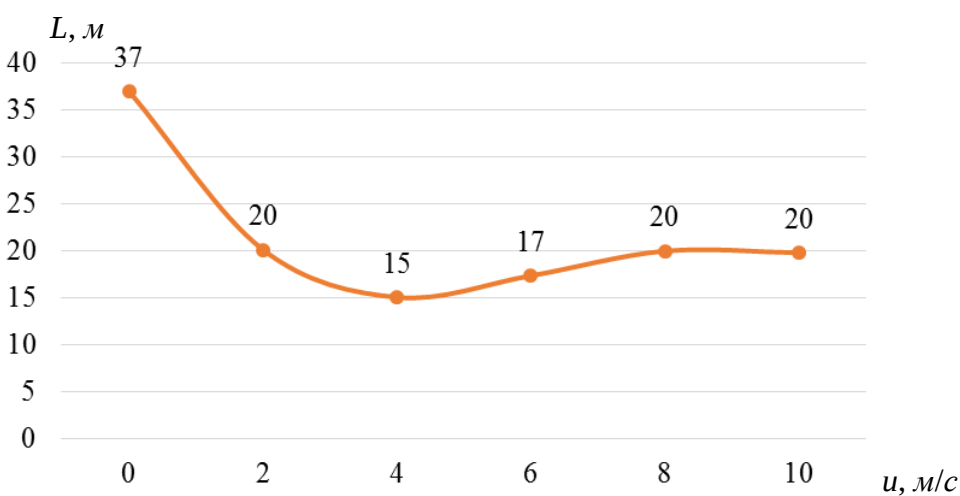
Максимальная скорость ветра при проведении численного моделирования была принята равной  $10\text{ м/с}$ , поскольку угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра (рис. 5) и длина пламени (рис. 6) перестают существенно меняться при дальнейшем увеличении скорости ветра.

На рис. 7 представлены графики зависимости интенсивности теплового излучения пламени горящего резервуара от расстояния от стенки указанного резервуара на высоте от поверхности земли, равной высоте стенки, при различных скоростях ветра.

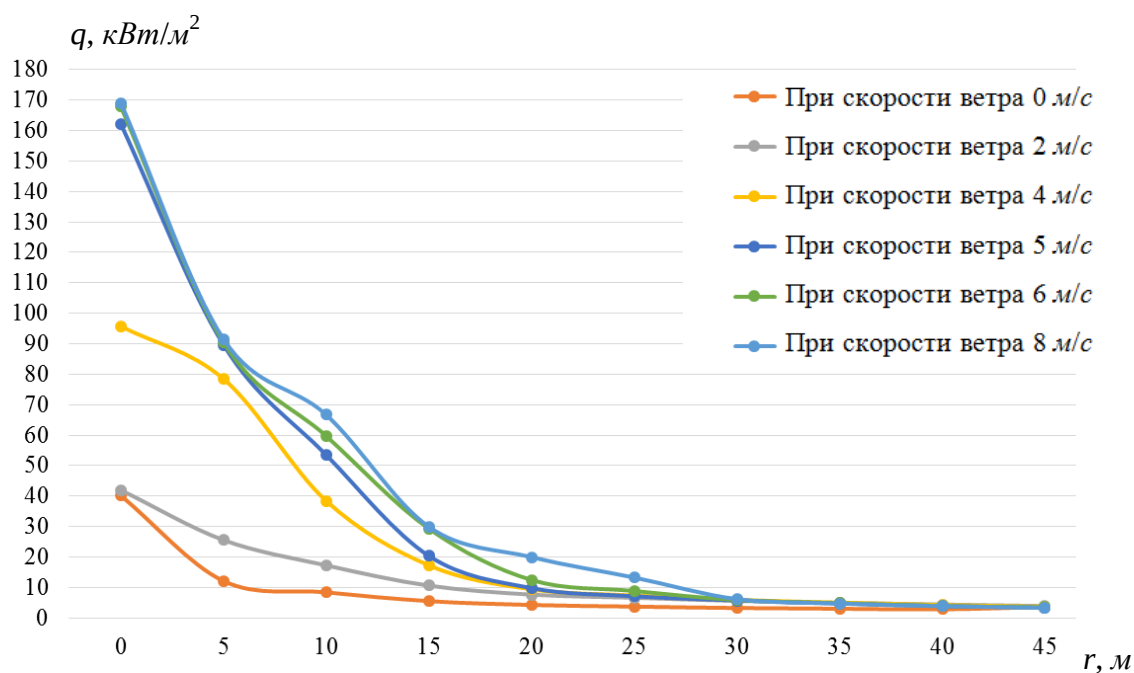
Резкое увеличение интенсивности теплового излучения на расстоянии до  $10\text{ м}$  от стенки горящего резервуара при скорости ветра свыше  $4\text{ м/с}$  обусловлено тем, что данная область находится в зоне непосредственного воздействия пламени.



**Рис. 5.** График зависимости угла отклонения оси пламени ( $\alpha$ ) от скорости ветра ( $u$ )

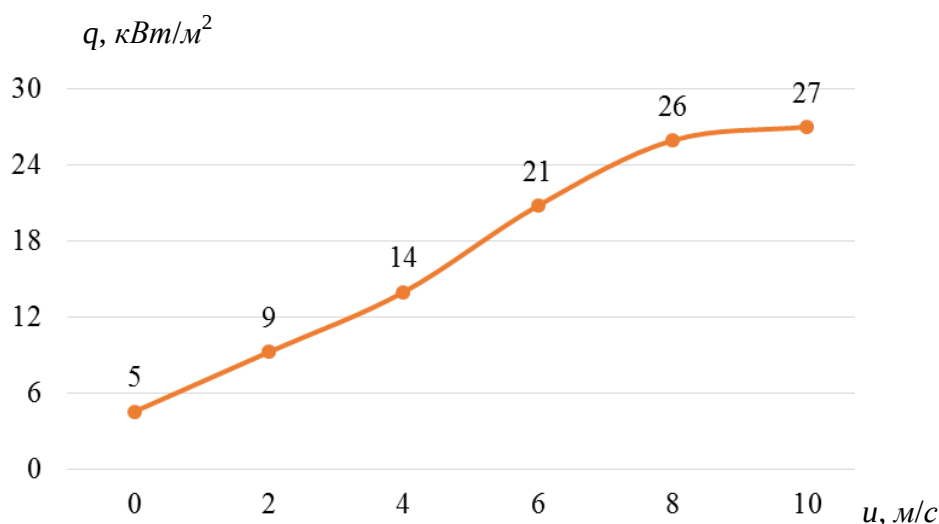


**Рис. 6.** График зависимости длины пламени ( $L$ ) от скорости ветра ( $u$ )



**Рис. 7.** Графики зависимостей интенсивности теплового излучения ( $q$ ) от расстояния от стенки горящего резервуара ( $r$ )

Анализ полученных результатов позволил установить, что при размещении резервуаров типа РВС-5000 м<sup>3</sup> с бензином на нормативном расстоянии друг от друга (17 м) интенсивность теплового излучения при скорости ветра свыше 3 м/с (рис. 8) превысит критическую для указанных резервуаров величину, равную 12,1 кВт/м<sup>2</sup> [6], то есть возможно каскадное распространение пожара.



**Рис. 8.** График зависимости интенсивности теплового излучения ( $q$ ) от скорости ветра ( $u$ ) при нормативном между резервуарами расстоянии ( $0,75 D_p = 17$  м)

Таким образом, результаты численного моделирования показывают возможность каскадного развития пожара в резервуарном парке при определённом направлении и скорости ветра, а также отсутствии своевременного охлаждения РВС, расположенного рядом с горящим. Полученные поля температуры и интенсивности теплового излучения могут использоваться для разработки способов, направленных на предотвращение каскадного развития пожара в резервуарном парке, а также для нахождения времени прогрева конструкций резервуара, расположенного рядом с горящим, до температуры самовоспламенения паров нефтепродукта.

### Литература

1. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности.
2. Тушение нефти и нефтепродуктов: пособие / И.Ф. Безродный и др. М.: ВНИИПО, 1996.
3. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2010.
4. Пожар на нефтебазе под Киевом. <https://life.ru/t/новости/155345/amp>.
5. Ansys Fluent 14.0: Theory Guide.
6. Методика определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404).
7. Пожар на нефтебазе под Усинском. <http://sktivkar.bezformata.ru/listnews/pozhar-na-tcisternah-s-neftyu-v-usinske/20384870>.
8. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко и др. М.: Стройиздат, 1988.

### References

1. SP 155.13130.2014. Sklady nefti i nefteproduktov. Trebovaniia pozharnoi bezopasnosti (Warehouses of oil and oil products. Fire safety requirements).
2. Tushenie nefti i nefteproduktov (The extinguishing of oil and oil products): posobie / I.F. Bezrodnyi i dr. M.: VNIPO, 1996.
3. Volkov O.M. Pozharnaia bezopasnost rezervuarov s nefteproduktami (Fire safety of tanks with oil products). SPb.: izd-vo Politekhn. un-ta, 2010.
4. Pozhar na neftebaze pod Kievom (The fire at the oil depot near Kiev). <https://life.ru/t/novosti/155345/amp>.
5. Ansys Fluent 14.0: Theory Guide.
6. Metodika opredeleniia raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh ob'ektakh (The method of determining the estimated values of fire risk at production facilities) (utv. prikazom MChS Rossii ot 10 iiulia 2009 g. № 404).
7. Pozhar na neftebaze pod Usinskom (The fire at the oil depot near Usinsk). <http://sktivkar.bezformata.ru/listnews/pozhar-na-tcisternah-s-neftyu-v-usinske/20384870>.
8. Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniakh (Thermogasdynamical fires in buildings) / V.M. Astapenko i dr. M.: Stroiizdat, 1988.