

# Анализ риска

УДК 331.461

© С.И. Сумской, А.В. Пчельников, М.В. Лисанов, 2006

## О РАСЧЕТЕ ОБЪЕМОВ РАЗЛИВОВ ОПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ АВАРИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

С.И. СУМСКОЙ, А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, канд. физ.-мат. наук, М.В. ЛИСАНОВ, д-р техн. наук  
(ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность»)

**К**оличественная оценка объемов аварийных разливов нефти, нефтепродуктов и других опасных жидкостей необходима при расследовании аварий, разработке проектной документации, деклараций промышленной безопасности, планов ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, обосновании условий страхования и иных документов, связанных с безопасностью объектов трубопроводного транспорта (магистральные, промысловые и внутрипромысловые трубопроводы).

Несмотря на достаточное число теоретических работ по расчету объемов разливов жидкостей из разгерметизированного трубопровода [1–7], на практике нередко допускаются упрощения и даже грубые ошибки, приводящие к существенному искажению масштабов последствий аварий и даже абсурдности полученных результатов. Анализ деклараций промышленной безопасности выявил следующие группы типовых ошибок при расчете возможных потерь опасных веществ в случае аварии на объектах трубопроводного транспорта:

1) игнорирование существенной нестационарности переходных процессов, сопровождающих аварийную разгерметизацию протяженного магистрального трубопровода в течение нескольких минут, а именно в течение времени, за которое останавливаются насосы, срабатывает запорная арматура;

2) использование формул гидростатики Бернулли, квазистатического приближения для гидродинамического процесса при «полных» разрывах трубопроводов (или при образовании дефектного отверстия с эффективным диаметром  $d > (0,05 \div 0,1)D$ , где  $D$  — внутренний диаметр трубопровода);

3) неучет возможности образования парогазовой полости в жидкости в условиях действия волны разгрузки, например, в вершинах профиля трассы («перевальных точках»);

4) ошибки учета или игнорирование при расчетах процесса образования двухфазных (газожид-

костных) потоков в течении изначально жидкого продукта, например, при вскипании вытекающего конденсата или аммиака;

5) завышение объемов разлива в случае течения с неполным перекрытием потоком сечения трубопровода (как правило, такие регламентные режимы транспортирования реализуются при погрузке нефти на терминалах).

В этой связи рассмотрим подробнее алгоритм расчета истечения и объема опасной жидкости (для простоты — нефти) при аварийной разгерметизации трубопровода. Согласно методическому руководству [1] суммарный объем аварийного выброса складывается из трех составляющих (стадий):  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  — объемов нефти, вытекшей соответственно в напорном режиме, т.е. с момента повреждения до остановки перекачки; в безнапорном режиме, с момента остановки перекачки до закрытия запорной арматуры; с момента закрытия задвижек до прекращения утечки (до момента прибытия аварийно-восстановительных бригад или полного опорожнения отсеченной части трубопровода).

Такое разделение на стадии с точки зрения протекающих физических процессов достаточно условно, поскольку движение нефти в самом общем случае описывается на всех стадиях одними и теми же физическими законами, которые понятным образом не зависят, например, от степени закрытия запорной арматуры.

Однако используемое в руководстве [1] разбиение процесса аварийного выброса нефти на стадии имеет существенные достоинства как для практического использования результатов расчета, так и в целях выбора модели для проведения расчета. С практической точки зрения разбиение на стадии дает возможность определить эффективность действий по остановке перекачки нефти. При выборе подхода к расчету объема разлива нефти вышеприведенное разбиение на стадии позволяет, выявив для каждой из них доминирую-

щие процессы, использовать оптимальные подходы, дающие без излишних затрат ресурсов качественные результаты.

На каждой из трех стадий скорость и объем выброса, а также характеристики течения нефти в трубопроводе определяются рядом факторов. При этом на разных этапах развития аварийной ситуации на передний план могут выходить и играть определяющую роль различные физические процессы.

Перечислим факторы и процессы, влияющие в той или иной степени на течение нефти в трубопроводе:

нагнетание в трубопровод нефти насосами с реальными характеристиками и работающими в различных режимах;

перемещение нефти внутри трубопровода в условиях перепада высот, в том числе в режиме неполного перекрытия нефтью сечения трубопровода;

истечение нефти из разрушенного трубопровода, в том числе истечение в грунты и в воду (для подводных участков);

потери на трение о стенки трубопровода;

волновые процессы в нефтепроводе; распространение в нем волн сжатия-разрежения в случае возникновения в потоке каких-либо возмущений, например, при закрытии запорной арматуры или при разрушении трубопровода;

перекрытие потока нефти запорной арматурой различных типов, срабатывающей, в общем случае, в разное время с различной скоростью;

образование в нефтепроводе газовых полостей и взаимодействие потока нефти с ними; проникновение воздуха внутрь трубопровода на месте разрушения, распространение воздушных пузырей по нефтепроводу<sup>1</sup>;

срабатывание на трубопроводе предохранительных клапанов, открытие вантузов, действие различных регулирующих устройств;

изменение диаметра трубопровода по трассе;

наличие ответвлений любой топологии;

транспортирование по трубопроводу разной по своим свойствам нефти;

температурное неравновесие в системе «нефть—труба—грунт», теплообмен в этой системе.

Безусловно, часть из перечисленных факторов имеет первостепенное значение для моделирования объема разливов. Например, учет рельефа местности, по которой проходит нефтепровод,

<sup>1</sup> Для подводных участков, естественно, вместо воздуха следует рассматривать воду, проникающую в трубопровод.

или учет потерь на трение при существенной скорости течения нефти в трубопроводе. Другие факторы, например теплообмен в системе «нефть—труба—грунт», могут вообще слабо влиять на объем утечек, и ими можно пренебречь.

Может показаться, что учет перечисленных процессов представляет собой сложную задачу и описание течения (и истечения) нефти в трубопроводе в заявленной полноте вообще невозможно. На самом же деле современные компьютерные технологии позволяют решить эту задачу. Одним из численных методов, открывающим такие возможности, является метод Годунова—Колгана в приложении к одномерным течениям нефти. Его достоинства изложены в [6].

В руководстве [1] дано описание модели, учитывающей основные процессы, определяющие движение нефти в трубопроводе от момента разгерметизации до окончания стока. Согласно [1] для корректного расчета объема и скорости выброса в первую очередь необходимо учитывать первые шесть факторов из перечисленных выше.

Если их не учитывать, то можно получить существенно искаженную картину течения и, как следствие, неверные оценки объемов утечек, а поскольку они — отправная точка для всех последующих оценок, ошибка в их определении может привести к искажениям и при расчете показателей ущерба и риска.

К сожалению, на сегодня сложилась ситуация, когда при анализе риска магистральных нефтепроводов (МН) не всегда корректно применяются изложенные в [1] принципы. Одна из типичных ошибок при определении объемов утечки состоит в том, что для расчета динамически изменяющихся потоков в протяженных трубах с существенным влиянием трения используются формулы гидростатики. Например, при разработке деклараций промышленной безопасности МН некоторыми разработчиками применяется известная из гидростатики формула Бернулли. Однако эта формула используется при определении скорости истечения из емкости, в которой находится покоящаяся жидкость. Истечение происходит за счет наличия столба жидкости высотой  $\Delta H$  над уровнем отверстия разгерметизации:

$$Q = \mu S \sqrt{2g\Delta H}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход нефти через дефектное отверстие;  $\mu$  — коэффициент, равный 0,6;  $S$  — площадь отверстия разгерметизации;  $g$  — ускорение свободного падения.

Формула (1) применяется для всех стадий истечения.

Объемы  $V_1$  и  $V_2$  определяются путем умножения соответствующего расхода  $Q_1$  и  $Q_2$  на время, необходимое на отключение насоса  $\tau_1$ , и время полного перекрытия запорной арматурой трубопровода, отсчитываемое от времени остановки насоса  $\tau_2$ ,

$$V_1 = \tau_1 Q_1 \text{ и } V_2 = \tau_2 Q_2. \quad (2)$$

Величина  $\Delta H$  выбирается исходя из максимального перепада высот, поскольку предполагается, что основным фактором, определяющим скорость выброса, является гидростатическое давление столба нефти от уровня отверстия разгерметизации.

Модельный профиль трассы магистрального трубопровода, характерный, например, для проектируемого нефтепровода «Восточная Сибирь—Тихий океан», приведен на рис. 1. Диаметр трубопровода 1220 мм, время отключения насосов  $\tau_1 = 2$  мин, интервал времени от остановки насосов до полного закрытия задвижек  $\tau_2$  — еще 7 мин.

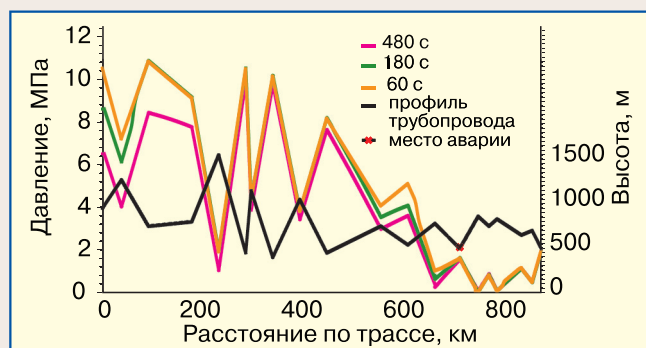


Рис. 1. Рельеф трассы и профили давления в разное время после разрушения: через 1, 3, 8 мин

Из рис. 1 следует, что перепад высот по трассе может составлять около 1200 м. По формулам (1) и (2) были получены объемы утечек. Например, для 661-го км, где перепад высот 1050 м, они составили для гильотинного разрыва ( $S = 1,17 \text{ м}^2$ )  $V_1 = 12\,074 \text{ м}^3$  и  $V_2 = 42\,260 \text{ м}^3$  при расходе нефти  $Q_1$  и  $Q_2$  около  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Рассмотрим подробнее полученные результаты. Выброс (расход) нефти из разрушенного на полное сечение трубопровода  $100 \text{ м}^3/\text{с}$  означает, что к месту разрыва на протяжении сколь угодно долгого времени по трубопроводу должна поступать нефть с тем же расходом, что соответствует линейной скорости прокачки  $86 \text{ м}/\text{с}$ . Такой скоро-

сти течения нефти по трубопроводу достичь в рамках регламентированных давлений, конечно, невозможно.

Ошибочность результатов, полученных для рассматриваемого нефтепровода, можно пояснить также следующим образом. Рассмотрим гильотинный разрыв в самом конце трассы и определим расход нефти в такой аварийной ситуации. Он составит те же  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ : в конце нефтепровода высотная отметка та же, что и на рассмотренном 661-м км. Очевидно, что данная ситуация с гильотинным разрывом в конце трассы фактически соответствует регламентированному режиму работы нефтепровода по перекачке нефти из начального пункта в конечный. Как уже отмечалось ранее, скорость перекачки  $86 \text{ м}/\text{с}$ , т.е. величина, намного превосходящая фактические скорости перекачки нефти по МН (до  $3 \text{ м}/\text{с}$ ).

Иными словами, получается, что, согласно выполненным расчетам, рассматриваемый нефтепровод может перекачивать нефть с физически нереальной скоростью, в 50–100 раз превышающей скорость на существующих трубопроводах. Причем такая скорость перекачки достигается вне всякой связи с насосами, стоящими на входе трубы, и может существовать сколь угодно долго. Становится ясным, что данные расчеты ошибочны и величина ошибки составляет тысячи процентов.

Очевидно также, что ошибка в расчетах обусловлена неправильным выбором модели. Уравнения (1) и (2) не могут применяться для определения утечек при гильотинных разрывах нефтепроводов, поскольку они предполагают, что среда вблизи места истечения находится в состоянии покоя, а давление на месте выброса остается постоянным и равным гидростатическому, создаваемому столбом нефти заданной высоты. На самом деле такая (точнее похожая) ситуация существует только в начальные, после образования дефектного отверстия, моменты: в это время на месте разрыва наблюдается давление, равное давлению в трубопроводе. Однако затем от места разрыва распространяются волны разрежения, которые приводят к падению давления на месте разрыва. В ситуации, когда давление на месте разрыва падает практически до атмосферного, скорость выброса будет полностью определяться скоростью поступления нефти по трубопроводу к месту разрыва. А эта величина уже будет зависеть от множества неучтенных в формулах (1) и (2) факторов, таких, как характеристики насосов, рельеф местности, степень закрытия задвижек, действие сил трения. Причем «работать» эти факторы будут не только на

месте выброса, а на протяжении всей трассы. Учет их и, прежде всего, потерь на трение приведет к тому, что скорость выброса значительно упадет, так как влияние того же трения растет пропорционально квадрату скорости.

Для сравнения приведем расчеты, выполненные по разработанной в НТЦ «Промышленная безопасность» компьютерной программе, предназначенной для моделирования течений по трубопроводам нефти, газа и двухфазных сред. Программа позволяет моделировать и аварийные ситуации. Компьютерная программа создана на основе изложенной в [1] модели, и в ней учтены все наиболее существенные факторы, необходимые для корректного предсказания объемов выброса.

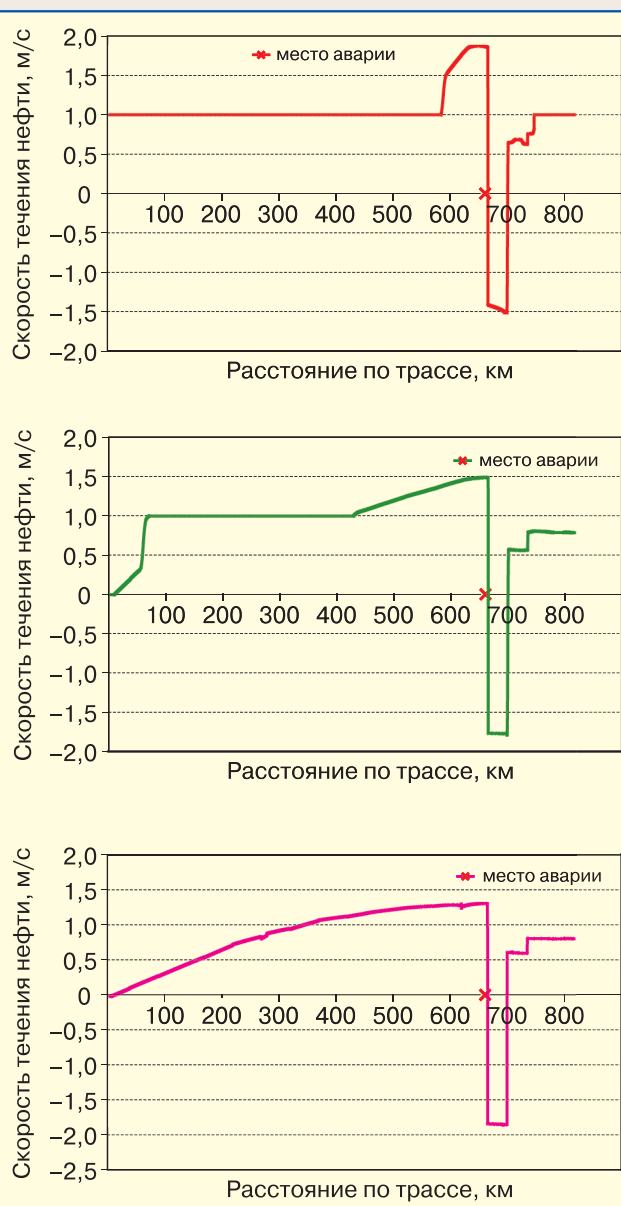
Отметим, что авторы не ставили целью моделирование конкретных типов оборудования, конструкций или режимов перекачки, поэтому при проведении расчетов некоторые исходные данные, например характеристики насосов, принимались достаточно произвольно. Естественно сделанные допущения никоим образом не искажают физической картины и затрагивают лишь технологические параметры работы трубопровода.

На рис. 1 приведены высотные отметки и профили давления по трассе трубопровода в случае гильотинного разрыва на 661-м км, т.е. это та же самая аварийная ситуация, что рассмотрена ранее в данной статье в качестве примера. Профили давления зафиксированы в отрезки времени 1, 3 и 8 мин после разрыва. В результате распространения волн разгрузки падает давление в МН.

Наиболее хорошо картина течения видна на профилях скорости (рис. 2). При разрыве трубопровода от места аварии по МН начинают распространяться волны разгрузки со скоростью около 1300 м/с. В волне, распространяющейся от места разрушения к началу трубопровода, течение нефти ускоряется и составляет 1,5–2 м/с, а в волне, движущейся от места разрушения к концу трубопровода, скорость течения нефти, наоборот, тормозится, и она начинает даже двигаться в обратную сторону (поэтому скорость на участке 661–697-й км имеет отрицательное значение), происходит так называемый обратный сток, скорость которого также составляет 1,5–2 м/с.

До разрыва, в регламентированном режиме, скорость транспортирования нефти составляла 1 м/с. Помимо волн разрежения, распространяющихся от места разрушения, хорошо видны и другие особенности течения:

распространение волны разгрузки от начала трубопровода после остановки насоса (см. рис. 2, б) 3 мин;



**Рис. 2. Изменение скорости течения нефти в МН в зависимости от расстояния в разное время после разрушения:**

а —  $\tau = 1$  мин; б —  $\tau = 3$  мин; в —  $\tau = 8$  мин

возникновение на трассе точек (локальных максимумов профиля трассы), которые характеризуются тем, что сток от этих точек происходит с различной скоростью и в разные направления; например, после разрушения трубопровода на 661-м км, точка на 695-м км с высотной отметкой 860 м является локальным максимумом для участка 661–821-й км; в отсутствие нагнетания в трубу нефть не может перевалить через эту высоту, поэтому до этой точки она стекает к месту разрыва (обратный сток), а после нее — к концу трубопровода;

независимая от времени ширина области отрицательных значений скорости течения нефти (см. рис. 2), характеризуемая продолжительным обратным стоком, от локального максимума на 697-м км к месту разгерметизации на 661-м км.

Расход нефти из двух концов разрушенного трубопровода практически постоянен (за исключением промежутка времени в несколько секунд после разрыва трубопровода) и составляет 3,8–3,9 м<sup>3</sup>/с, т.е. расход или объемный сток с одного конца менее 2 м<sup>3</sup>/с. Расходы нефти в 100 м<sup>3</sup>/с, полученные с помощью формул гидростатики, безусловно, не могут быть достигнуты. Для окончательного прояснения вопроса о параметрах течения на месте выброса на рис. 3 представлена зависимость давления в трубопроводе вблизи места разрушения. Из рисунка видно, что вблизи места аварии в первые мгновения за счет распространения волны разрежения резко, почти на 2,5 МПа, падает давление, затем медленно, по мере истечения нефти из трубопровода, идет его плавный спад. Отметим, что гидростатического давления в 10 МПа на месте стока не существует.

Таким образом, рассмотренный пример показал недопустимость использования упрощенных моделей при расчете объемов утечек на МН. Для анализа риска на МН следует использовать методы, учитывающие основные физические процессы, в частности методы численного моделирования.

Вышеуказанное необходимо использовать при практических работах, экспертизе деклараций и совершенствовании нормативно-методического обеспечения анализа риска объектов трубопроводного транспорта, в том числе при актуализации Методического руководства [1].

### Список литературы

1. РД. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах (ут-

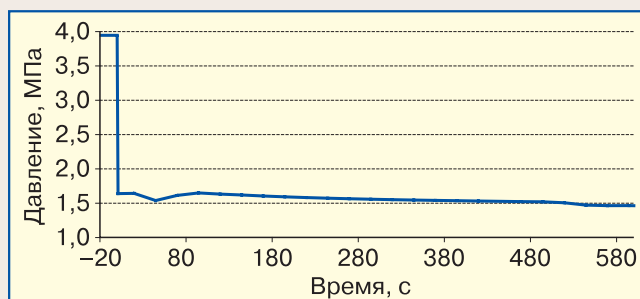


Рис. 3. Зависимость давления нефти в МН вблизи места аварии от времени (стадии 1 и 2). Разрыв МН произошел в 0 секунд

верждено приказом ОАО «АК «Транснефть» от 30.12.99 № 152, согласовано Госгортехнадзором России от 07.07.99 № 10-03/418).

2. РД. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах (утверждено Минтопэнерго Российской Федерации, АК «Транснефть», 1996 г.)

3. Трубопроводный транспорт нефти: Учебник для вузов; Под ред. С.М. Вайнштока. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. — Т. 2. — 621 с.

4. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах: Учеб. пособие; Под общей ред. Ю.Д. Земенкова. — Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2002. — 432 с.

5. Лурье М.В., Полянская Л.В. Об опасном источнике волн гидравлического удара в рельефных нефте- и нефтепродуктопроводах // Нефтяное хозяйство. — 2000. — № 8. — С. 66–68.

6. Семинар «Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах». С.И. Сумской — О влиянии начальных данных на результаты расчета показателей риска магистральных нефтепроводов // Тезисы докладов. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2004. — С. 45–49.

7. Антипов В.Н., Налобина Е.В., Налобин И.Н. Аварийное истечение нефти из трубопровода при напорном режиме // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 1. — С. 37–41.

### 30 лет с Вами!

ЗАО «Центр научной организации и охраны труда» предлагает следующее:

разработку инструкций; плакаты ламинированные (формат А5–А2), журналы по ОТ и БДД, удостоверения, видеопособия на видеокассетах и CD, плакаты, схемы строповки на самоклеющейся пленке (формат А5–А2), нормативно-техническую литературу, знаки безопасности по ГОСТ 12.1.026–2001 на пластике, металле, самоклеющейся пленке; стенды по охране труда на пластике по индивидуальному заказу.

443011, Самара, ул. Советской Армии, д. 253, ЗАО «Центр НОТ» Тел/факс: (846) 222-41-20, 222-41-21, тел. 241-10-16

www.zentrnot.ru; e-mail zao@zentrnot.ru