

Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах



С.И. Сумской,
канд. техн. наук, ст.
преподаватель

НИЯУ МИФИ



А.А. Агапов,
канд. техн. наук, директор
по информационным
технологиям



А.С. Софьин,
канд. техн. наук, зав.
сектором

ЗАО НТЦ ПБ



А.М. Сверчков,
мл. науч. сотрудник



А.Ф. Егоров,
д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой

РХТУ им. Д.И. Менделеева

Рассмотрен программный модуль TOXI+Гидроудар, разработанный в составе программного комплекса TOXI+^{Risk}, позволяющий проводить численное моделирование нестационарных переходных процессов в трубопроводах, расчет утечек из магистральных нефтепроводов при различных аварийных ситуациях путем решения уравнений гидродинамики с использованием метода С.К. Годунова.

The software module TOXI+Gidroudar developed within the software complex TOXI+^{Risk} allowing implementation of numerical simulation of non-stationary transitional processes in pipelines; calculation of leakages out of trunk pipelines at various emergencies by the methods of solution of equations of hydrodynamics with application of S.K. Godunov's method has been considered.

Ключевые слова: магистральные нефтепроводы, переходные процессы, метод С.К. Годунова, гидроудар, TOXI.

В настоящее время трубопроводный транспорт — один из наиболее экономичных способов транспортирования нефти и нефтепродуктов. Жидкие углеводороды проходят через систему более чем 1600 крупных нефтебаз и хранилищ нефтепродуктов и 30 нефтеперерабатывающих заводов страны. Сеть продуктопроводов протянута по густонаселенным территориям центра европейской части России и исключительно ценным в сельскохозяйственном отношении районам юга России. Магистральные нефтепроводы (МН) проходят вблизи населенных пунктов и промышленных предприятий (более 2800 зданий и сооружений находятся на минимально допустимых расстояниях от МН), 15 тыс. раз пересекают железные и шоссейные дороги, 2 тыс. — реки, каналы и озера.

По оценке экспертов, трубопроводный транспорт в 40 раз безопаснее железнодорожного и в 300 раз — автомобильного. Но в то же время аварии на нем приводят к наиболее масштабным нежелательным последствиям. При этом ущерб определяют, исходя не только из стоимости потерянного энергопродукта, но и из экологических последствий, которые трудно ликвидировать, а также из возможной гибели людей [1, 2].

Чтобы избежать разливов нефти либо минимизировать ущерб для окружающей среды в случае аварии, принимают целый ряд мер в части мониторинга режимов перекачки и показателей течения в нефтепроводе.

Анализ показывает, что аварии с гибелью людей на российских магистральных трубопроводах достаточно редки [3]. Однако в условиях их прокладки вблизи населенных пунктов, объектов производственной и транспортной инфраструктуры не исключена возможность поражения людей при аварии. Особый резонанс вызывают крупные промышленные аварии с групповой гибелью людей [4].

Поскольку нефтетранспортные объекты распределены на огромных территориях, то природоохранный статус таких объектов чрезвычайно высок с точки зрения требований экологической безопасности и минимизации риска. В этой связи моделирование последствий аварий и количественный анализ риска трубопроводного транспорта играют важную роль [4–6]. Особое значение решение этих задач приобретает для трубопроводов, по которым транспортируют широкую фракцию легких углеводородов [7], поскольку при аварии в этом случае зо-

ны поражения имеют большую пространственную протяженность.

В процессе эксплуатации МН при остановке насосных станций, перекрытии запорной арматуры, переключении режимов перекачки возможны переходные (нестационарные) процессы, в ходе которых формируются волны роста давления (волны сжатия) и уменьшения давления (волны разгрузки). Волны сжатия, распространяясь вдоль трубопровода, могут привести к перегрузкам по давлению (гидроудару) и, как следствие, к разрыву трубы или образованию опасных дефектов. Волны разгрузки могут быть причиной недопустимого понижения давления, способного нарушить сплошность потока, что в свою очередь может вызвать ряд негативных процессов: усиление ударных волн, повышение механических вибраций элементов системы [8].

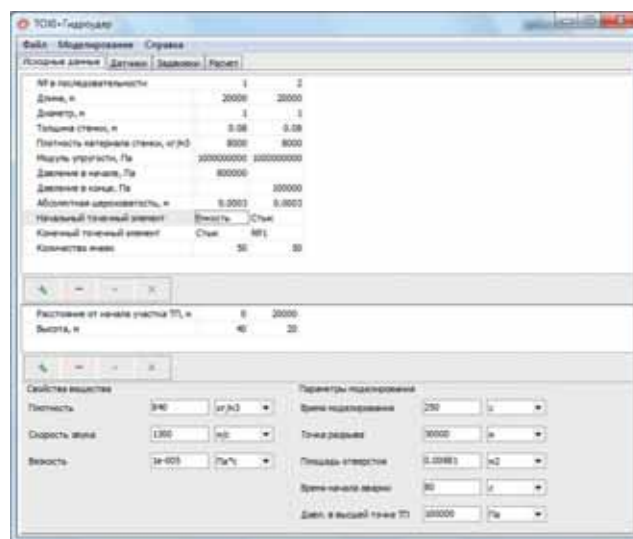
При анализе и оценке последствий аварий на МН необходимо достаточно точно описывать движение среды внутри самого МН, поскольку именно моделирование течения нефти — основа для определения скорости, а следовательно, и объема выброса.

Известны работы [9], в которых для расчета течений в МН применяют конечно-разностные методы. В них частные производные в дифференциальных уравнениях законов сохранения заменяют разностными аналогами, обычными разностями. Получаемые таким образом алгебраические выражения могут быть решены различными методами. Однако сложность при их практической реализации состоит в том, что не все свойства исходных дифференциальных уравнений сохраняются в полученных алгебраических выражениях. Поэтому требуется соблюдать сложные процедуры, чтобы обеспечить даже приблизительное совпадение численных решений с реальными данными.

Один из разностных методов — метод С.К. Годунова [10], который обладает более высокой универсальностью по сравнению с другими методами, например с методом характеристик [11], позволяет естественным образом, без существенных усложнений переносить в численные решения свойства точных решений. До недавнего времени основным недостатком этого метода считалось сравнительно длительное время проведения расчетов. Но современные алгоритмические и аппаратные решения сделали этот метод более доступным.

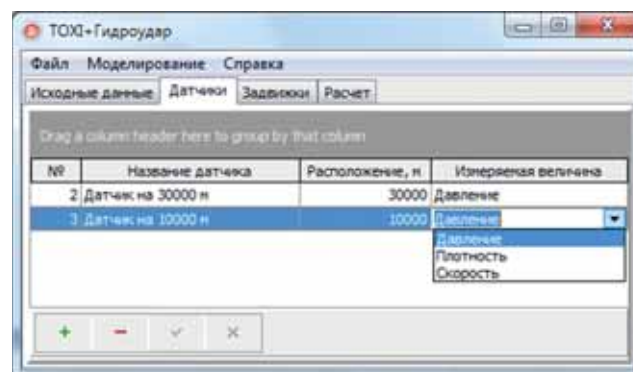
В развитие программного комплекса TOXI+Risk [12] в ЗАО НТЦ ПБ разработали программный модуль TOXI+Гидроудар, позволяющий моделировать нестационарные переходные процессы и аварийные ситуации на МН с использованием метода С.К. Годунова. Для решения основных уравнений гидродинамики потока использован метод конечных разностей, относящийся к подразделу механики сплошных сред — вычислительной гидродинамике (Computational fluid dynamics — CFD, англ.).

Исходные данные для задания численной модели линейной части трубопровода (рис. 1): длина, диаметр, толщина и плотность материала стенки, модуль упругости, давление в начале и в конце трубопровода, абсолютная шероховатость и количество ячеек разностной сетки, а также граничные условия в начале и в конце трубопровода. В программном модуле предусмотрена возможность задания любого числа последовательных линейных участков. Их соединение осуществляют путем выбора одних и тех же граничных условий в конце ($n - 1$)-го и в начале n -го линейных участков. Рельеф каждого участка задают неограниченным количеством пар данных: расстояние от начала и высота. Также есть две группы общих исходных данных: свойства вещества (плотность, вязкость и т.д.) и параметры моделирования (площадь отверстия, время начала разгерметизации, общее время моделирования и др.).

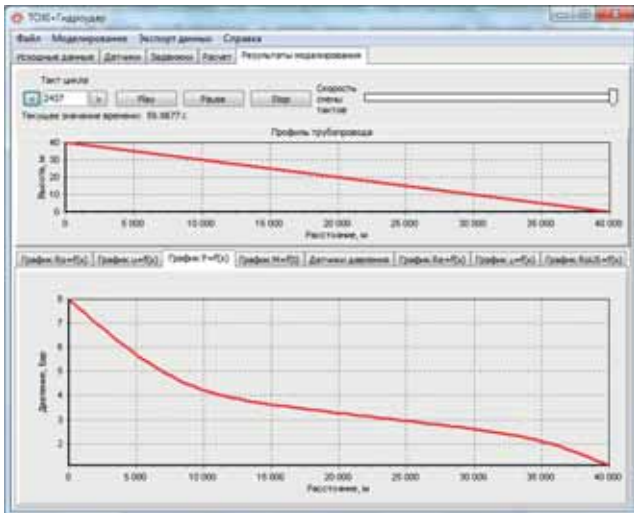


▲ Рис. 1. Исходные данные моделирования

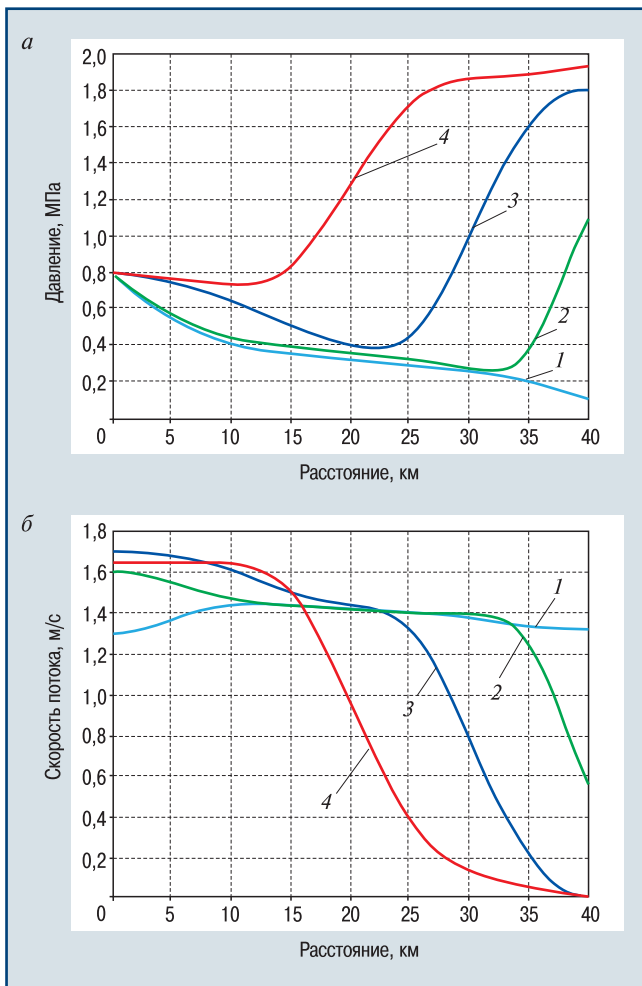
На вкладке «Датчики» (рис. 2) реализована возможность задания неограниченного числа датчиков, измеряющих давление, плотность или скорость потока в выбранной точке трубопровода. На вкладке «Задвижки» вводят характеристики запорной арматуры (задвижки, краны), в том числе время их закрытия (открытия), начальное состояние, а также массив направлений движения (открытие, закры-



▲ Рис. 2. Вкладка «Датчики»



▲ Рис. 3. Панель графических зависимостей: профиль давления в трубопроводе (неустановившийся режим транспортирования вещества)



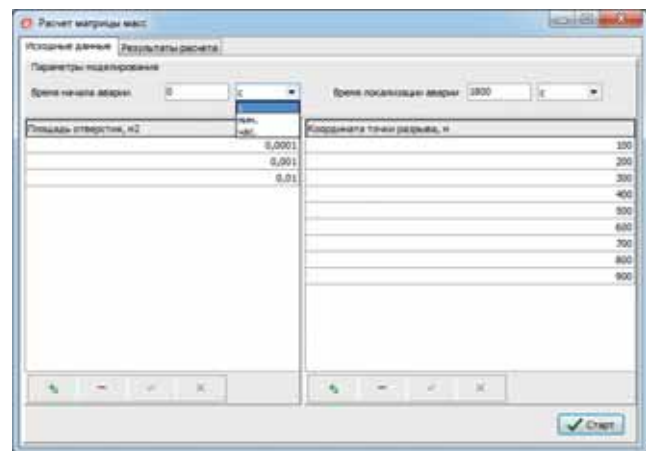
▲ Рис. 4. Графическое отображение результатов моделирования: профили давления (а) и профили скорости потока (б) в МН в различные моменты времени: 1 – 59,99 с; 2 – 65,01 с; 3 – 72 с; 4 – 80 с

тие) и время срабатывания. На вкладке «Расчет» задают параметры, в том числе интервал времени, в течение которого будет вестись запись величин,

для вывода результатов моделирования в виде графических зависимостей (например, массы выброса от времени моделирования, профили давления, плотности, скорости по длине линейного участка и др.) (рис. 3).

В программном модуле есть возможность экспорта после окончания процесса моделирования результатов (как всех, так и выборочных, т.е. за определенные моменты времени) в MS Excel для дальнейшего использования. На рис. 4 отображены графически результаты моделирования, исходные данные для которого представлены на рис. 1. В указанном случае в начале трубопровода расположена емкость, а в конце — задвижка, которая срабатывает на 60-й секунде. По профилям давления видно, что после закрытия задвижки происходит резкое увеличение давления (гидроудар) и снижение скорости потока.

В программном модуле предусмотрен расчет массы вещества, вытекающего в результате разгерметизации трубопровода. Исходные данные для этих расчетов задают на специальной панели (рис. 5): время начала и локализации аварии, размеры отверстий, расстояние от начала трубопроводной системы до точки разгерметизации. В результате получаем таблицу со значениями массы вещества (рис. 6), вытекающего в результате аварии, при различных условиях разгерметизации трубопровода, которую можно экспортировать в MS Excel.



▲ Рис. 5. Панель исходных данных для расчета массы вытекающего вещества при авариях с различными условиями разгерметизации трубопровода

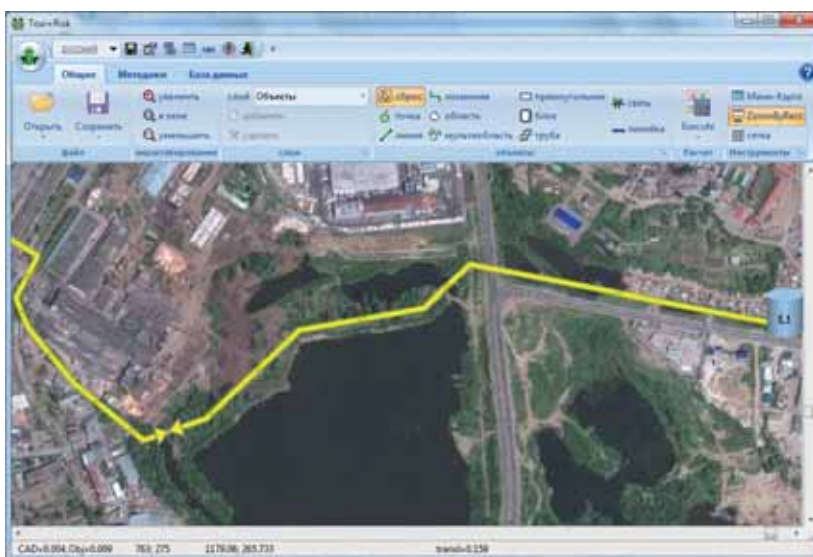
В перспективе предполагается интегрировать разработанный модуль в новую версию программного комплекса TOXI+Risk (версия 5). Пример задания трубопровода на картографической подложке программного комплекса представлен на рис. 7.

Таким образом, разработанный программный модуль TOXI+Гидроудар позволяет проводить:

гидравлические расчеты, численное моделирование переходных процессов и аварийных ситуаций в трубопроводных системах различной конфигура-

Площадь разрушения трубопровода, м²	Значения массы истекшего вещества при различных аварийных условиях, кг								
	100 м	200 м	300 м	400 м	500 м	600 м	700 м	800 м	900 м
0,0001 м²	7142,72	6736,2	6394,08	5846,65	5337,81	4783,13	4258,95	3416,74	2487,45
0,001 м²	69702,29	65965,21	61192,28	56526,57	51486,56	45947,49	39703,34	32360,3	22944,04
0,01 м²	683746,11	652264,63	616757,99	570281,84	52346,77	471330,72	413316,08	33944,64	118790,76

▲ Рис. 6. Масса пролива нефти в зависимости от расстояния места утечки от начала трубопроводной системы и площади разрушения трубопровода



▲ Рис. 7. Пример задания трубопроводной системы в программном комплексе TOXI+Risk

ции, т.е. с различными геометрическими характеристиками линейной части трубопровода (диаметр, длина), а также местами расположения, условиями стыковки и гидравлическими характеристиками точечных элементов (задвижки, насосы, местные сопротивления и т.д.);

расчеты массы выбросов транспортируемого вещества при различных сценариях аварий;

анализ возможности гидроудара, в частности отображать результаты моделирования как в графическом виде, что позволяет наглядно увидеть процесс резкого повышения давления, так и в табличном.

Модуль TOXI+Гидроудар можно применять при проектировании трубопроводных систем, при проведении количественной оценки риска для обоснования безопасности объектов трубопроводного транспорта, а также при разработке планов ликвидации аварийных ситуаций на опасных производственных объектах.

Список литературы

1. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. — М.: Ин-октаво, 2005. — 368 с.

2. Чеботарев С.С. Современное состояние и перспективы развития аварийно-спасательной техники// Оперативное управление мероприятиями РСЧС. — Новогорск: Институт развития МЧС России, 2002. — 254 с.

3. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта/ М.В. Лисанов, А.В. Савина, Д.В. Дегтярев, Е.А. Самусева// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 7. — С. 16–22.

4. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–63.

5. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС/ Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2002. — № 6. — С. 2–6.

6. Анализ риска аварий на нефтепроводных системах БТС и МН «Дружба»/ М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин, А.В. Пчельников и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 1. — С. 34–40.

7. Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2007. — № 2. — С. 48–52.

8. Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах с помощью метода С.К. Годунова/ С.А. Губин, Т.В. Губина, С.И. Сумской, М.В. Лисанов// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 10. — С. 66–71.

9. Селезнёв В.Е., Алёшин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов/ Под ред. В.Е. Селезнёва. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: МАКС Пресс, 2009.

10. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики// Мат. сб. — 1959. — Т. 47 (89). — № 3. — С. 271–306.

11. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. — М.: Нефть и газ, 2003. — 336 с.

12. Использование программного комплекса ТОКСИ+Risk для оценки пожарного риска/ А.А. Агапов, И.О. Лазукина, А.Л. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 1. — С. 46–52.

inform@safety.ru

Материал поступил в редакцию 18 августа 2014 г.