

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНОГО ИСТЕЧЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Ключевые слова: аварийный разлив нефтепродуктов, объемы утечек, площадь разлива, методика моделирования, пространственная модель.

Рассмотрены принципы построения пространственной модели для проектирования объемов аварийного разлива. Предложена методика расчета площадей разливов на ЭВМ. Приведены ключевые параметры, влияющие на моделирование. Проблема оценки истечения нефтепродуктов через отверстия небольшого диаметра представляет собой актуальную задачу.

Keywords: emergency oil spill, leak rate, area of the spill, simulation method, three-dimensional model.

The principles of the construction of a three-dimensional model for the design volumes of the emergency pool. Proposed the methods of calculating the spill area with a computer. Presented the key parameters that affect the simulation. The problem with assessing the expiration of petroleum products through small diameter holes is an actual problem.

С развитием нефтяной промышленности, особую остроту приобретает проблема экологической безопасности при использовании магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Разгерметизация магистрального нефтепровода приводит, к значительному экологическому ущербу с возможными непоправимыми последствиями для окружающей природной среды [1]. Надёжность систем магистрального нефтепровода является важнейшим фактором стабильности и роста экономического потенциала России.

Объем утечек нефти при авариях на нефтепроводах зависит от места и размеров повреждения, а также от времени его обнаружения и устранения. Объем вытекшей нефти может оказаться значительным даже при относительно небольших повреждениях, если они остаются незамеченными в течение длительного времени. Вследствие этих причин прогнозирование последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов является актуальной задачей. Разработка методики прогнозирования площадей и объемов разлива на объектах химической, нефтехимической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности и других отраслей позволит спрогнозировать и проанализировать различные сценарии аварий на нефтепроводах. Информация о характере поведения нефтяного пятна, позволит максимально быстро и эффективно задействовать механизмы по борьбе с аварийным разливом нефти и нефтепродуктов, сокращая тем самым экологический ущерб нанесенный данными авариями [2]. Прогнозирование последствий аварийных разливов нефти, нефтепродуктов и других опасных жидкостей необходима при разработке проектной документации, деклараций промышленной безопасности, планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов и иных документов, связанных с безопасностью объектов трубопроводного транспорта.

Прогнозирование последствий аварий включает в себя оценку следующих показателей [3]:

- объем вылившихся из продуктопровода жидких углеводородов;

- объем углеводородов, выделившихся в атмосферный воздух;

- площадь и степень загрязнения водоемов;

- площадь, объем и степень загрязнения почвогрунтов.

Наибольшие трудности связаны с оценкой последнего показателя. В настоящее время отсутствует доступная инженерная методика моделирования разлива жидких углеводородов, учитывающая рельеф местности, свойства грунтов и поверхностного слоя в районе аварии и т.д. Также существует проблема оценки объема загрязненного грунта при аварийном истечении нефтепродуктов через отверстия небольшого диаметра (до одного дюйма).

Решение последней задачи можно разбить на два этапа:

Первый этап. Построение трехмерной модели истечения жидких углеводородов. Для построения модели необходимо рассмотреть три разреза, все разрезы проводятся через место аварийной протечки: первый проводится в направлении наибольшего понижения рельефа, второй – перпендикулярно первому разрезу, третий разрез проводится перпендикулярно первым двум. Точка пересечения является началом отсчета 3-х мерной системы координат. Таким образом, исходная информация для моделирования, представляет собой 3-х мерный массив g размером x, y, z элементов. Каждый элемент массива $g(x,y,z)$ является элементарной площадью грунта, в котором записана информация о свойствах грунта в зависимости от его влажности и дисперсности [3]. Линейные размеры всех элементов одинаковы и определяются точностью требуемых результатов и исходных данных. ЭВМ воспринимает и воспроизводит массивы размером x, y, z элементов как сеточные файлы, для облегчения работы.

Качество получаемых на основе проведения вычислительного эксперимента результатов напрямую зависит от качества построенной расчетной сетки. Предпроцессор GAMBIT позволяет быстро создавать и обрабатывать геометрии исследуемых процессов. GAMBIT имеет единый интерфейс для

создания геометрических моделей и построения сетки. Кроме того имеется возможность интегрировать результаты в другие программы [4]. Основным объектом моделирования интересующим в исследовании аварийного разлива нефтепродуктов является поверхность разлива и отверстие, через которое происходит истечение, поэтому следует увеличивать количество ячеек непосредственно на плоскости разлива по мере приближения к исходному отверстию, сгущать сетку. Это позволит в дальнейшем получать более точные результаты. От размера и количества ячеек в сетке напрямую зависит сложность вычислений, что сказывается на времени работы с ЭВМ. Экспериментальная модель представляет собой прямоугольную поверхность ограниченной четырьмя стенками, в нижней поверхности имеется отверстие для подвода исследуемой жидкости, которая предварительно заливается в бак, расположенной на некоторой высоте, для создания перепада давления на установке. Поверхность разлива имеет возможность изменять угол наклона для более близкого приближения к реальным условиям. Поскольку модель имеет явную ось симметрии, то, для упрощения расчетов и облегчения сеточного массива можно отбросить половину модели и отображать расчеты симметрично оси x . Таким образом после проведенных операций мы будем иметь следующую сеточную модель (рис. 1).

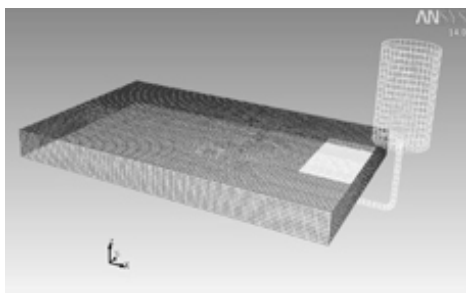


Рис. 1 - Пространственная сеточная модель для моделирования разлива жидкостей

Второй этап. Непосредственно расчет сеточной модели производится в пакете FLUENT. Широкий спектр физических моделей FLUENT позволяет решать самые разнообразные задачи — от обтекания крыла самолета до горения в коксовых печах, от расчета процессов в барботажных колоннах до производства стекла, от течения жидкости в кровеносных сосудах до изготовления полупроводниковых приборов и т.п. Такие возможности FLUENT, как постоянно развивающиеся модели турбулентности, горения, многофазных течений и течений со свободными границами, а также подвижные (деформируемые) и перестраиваемые сетки, значительно расширяют область его применения [4]. Расчет производился в двухфазной системе воздух-вода или воздух - дизельное топливо. Для еще более упрощения модели можно опустить некоторые её части, такие как бак и трубопровод, так как в них всегда находится одна фаза и эксперимент ставится на поверхности разлива, которая и отображается в дальнейшем.

Основными функциональными параметрами для Fluent в данном моделировании являются:

1) Гравитация, так как вода растекается на поверхности за счет гравитационных сил. Они задаются в рабочих условиях (Operating Conditions). Для удобства и корректности расчета точкой приложения рабочего (атмосферного) давления является точка внутри установки, где всегда располагается лишь одна фаза - воздух, там возмущения этого давления будут наименьшими. Гравитационное ускорение $g = -9,81 \text{ м/с}^2$ имеет знак минус, что показывает что оно направлено вниз по оси Z .

2) Модель решателя Volume of Fluid (Объемы жидкостей) позволяет обесчитывать объемные модели с несколькими фазами (минимальное число фаз-2) во временных интервалах [4]. Главным для модели является число Куранта, которое желательно соблюдать. Если число Куранта растет (в начале вычислений это возможно) и не уменьшается (после 10-20 временных шагов) и начинает превышать 0.40, то это означает, что, скорее всего, произойдет срыв вычислений. В этом случае необходимо, запустить вычисления с самого начала при этом:

- уменьшить временной шаг,
- уменьшить скорость потока.

Расстояние, которое поток жидкости проходит за время одного шага определяется формулой (1):

$$r = v \cdot \tau \quad (1)$$

где v — скорость потока в исследуемом месте, τ — временной шаг;

Линейный размер ячейки сетки в исследуемом месте сетки обозначим за d , тогда число Куранта определяется следующим соотношением (2):

$$Cu = r/d \quad (2)$$

Таким образом, $Cu < 0.25$ означает, что за время одного временного шага поток продвигается не более чем на одну четверть ячейки. В этом случае Fluent считает корректно.

3) Модель вязкости. Так как течение здесь спокойное, то выбираем самую простую модель: $k-\epsilon$ с оптимизацией RNG — это наиболее устойчивая модель. Опция Differential Viscosity Model позволяет корректно вычислять потоки при низких числах Рейнольдса, которые здесь должны иметь место (малые скорости течения вязкой нефти).

4) Материалы выбираются из FLUENT Database, затем обозначаются фазы и задается очень малое значение поверхностному взаимодействию воздуха и жидкости. Собственно взаимодействие воздуха с нефтью через их поверхности нам не нужно. Воздух с такими малыми скоростями (менее 0.1 м/с) никак не влияет на растекание нефти. Но без опции Surface Tension не включается нужная нам опция Wall Adhesion. Это очень важная опция, она определяет угол смачивания нефтью поверхности плоскости. Что касается угла смачивания, то эта величина выставляется в дальнейшем при определении граничных условий на плоскости растекания (тип WALL).

При моделировании процессов истечения жидких углеводородов полученные системы урав-

нений решаются методом конечных элементов, с разбиением расчетных областей на прямоугольные ячейки, в которых занесена информация о свойствах грунта. В результате моделирования аварии определяются площадь, геометрия разлива нефтепродуктов и объем загрязненного грунта [5].

На построенной сеточной модели был поставлен эксперимент, полностью соответствующий, ранее проведенному, реальному опыту на экспериментальной установке. Для эксперимента были установлены следующие начальные условия: Тип поверхности - бетон;

Угол смачивания - 110° ;

Угол наклона поверхности – без наклона;

Диаметр отверстия – 11 мм;

Продукт разлива – вода;

Объем - 0.7 л.

Время эксперимента составило 15 секунд. В результате проведения моделирования были измерены площади разлива в разные промежутки времени. Полученные площади сравнивались с площадями полученными на реальной установке. Данные сравнения представлены на рис. 2.

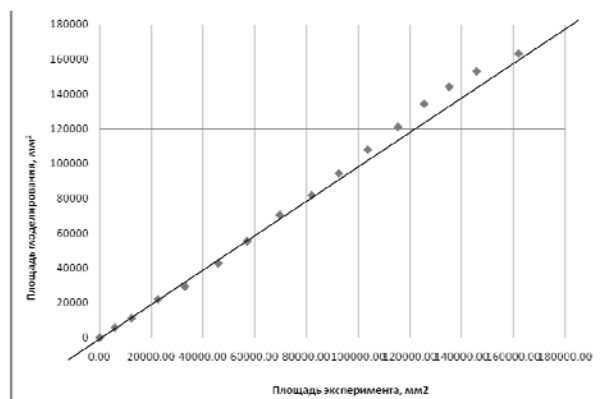


Рис. 2 - Сравнение площадей полученных экспериментом (ось x) и площадей, полученных моделированием (ось y)

По результатам итогам результатов моделирования площадь пролива составляет 163151,25 мм² при площадях полученных на реальной установке 161949,32 мм². Исходя из этого, и полученного графика, можно сделать вывод, что модель описывает реальную установку с точностью $\pm 3\%$.

Преимуществами прогнозирования площадей разлива на ЭВМ являются большая точность по сравнению с экспериментальной установкой и простота в обработке и представлении результатов вычислений. Исключается необходимость построения установки и проведения эксперимента.

Литература

1. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). – М.: Недра, 1982. – С. 11-22.
2. Гумеров А.Г., Ахметов Х.А., Гумеров Р.С., Векштейн М.Г. Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов. – М.: ООО "Недра - Бизнесцентр", 1998. – 290 с.
3. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах. (утв. Минтопэнерго России 1 ноября 1995 г. Согласованно с Департаментом Государственного экологического контроля Минприроды России) – Уфа: ИПТЭР, 1995. – 61 с.
4. Старченко А. В. Пакет прикладных программ FLUENT для решения задач механики жидкости и газа, тепло- и массопереноса / А. В. Старченко, Д. А. Беликов, В. Д. Гольдин, Р. Б. Нутерман. — Томск : Изд-во Том. ун-та, 2008. – 74 с.
5. Алексеев В.А., Алексеев С.В., Миннегалеев А.Н., Ахметов Р.Р. Моделирование процесса разлива нефти и нефтепродуктов при разгерметизации на подводных переходах магистральных нефтепродуктопроводов. Вестник Казанского технологического университета, 2011, №8, с. 172-177.