

УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, Р. А. Мышко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

ГИС моделирования нефтяных разливов на магистральных трубопроводах

Исследованы свойства и поведение нефтяных разливов при авариях на магистральных нефтепроводах. Проведен анализ основных этапов разлива нефти на суше, осуществлена оценка суммарного количества нефти, вылившейся из трубопровода, и факторов, влияющих на начальные объемы нефтяных разливов. Рассмотрены существующие методы моделирования распространения нефтяных разливов с учетом рельефа; разработан комбинированный алгоритм расчета конфигурации нефтяного загрязнения с последующей программной реализацией в виде скрипта на языке Python и отображением результатов на тематических картах в ГИС ArcGIS for Desktop. Исследованы вопросы влияния испарения и фильтрации нефти на конфигурацию разлива и оценена адекватность модели. В качестве примера моделирования выбраны возможные аварийные разливы нефти на магистральных нефтепроводах республики Башкортостан, так как республика Башкортостан является одним из наиболее значимых нефтедобывающих регионов России. Результаты работы алгоритма и реализованная программа могут применяться для выявления наиболее опасных участков нефтепровода, определения наиболее вероятных направлений распространения аварийных разливов в чрезвычайных ситуациях с целью их предотвращения и оптимизации работ по ликвидации последствий.

Математическое моделирование, разливы нефти, нефтепродукты, геоинформационные системы, анализ, ArcGIS for Desktop

В процессе экономической деятельности людей неотъемлемым является использование углеводородов, в частности нефти и газа. Производство большей части используемых на данный момент видов топлива предполагает переработку больших объемов нефти, что в свою очередь вызывает необходимость совершенствования систем транспортировки сырой нефти и нефтепродуктов. Наиболее эффективный метод транспортировки нефти и нефтепродуктов на данный момент – магистральный трубопроводный транспорт. С учетом возрастающих объемов добычи, транспортировки и переработки нефти актуален вопрос безопасности проводимых технологических процессов, в частности для России – одного из мировых лидеров по добыче нефтепродуктов.

Аварийные ситуации, связанные с транспортировкой нефти, наносят не только экономический ущерб из-за потери ресурса, но и серьезный экологический ущерб. Попадание нефти и нефте-

продуктов в почву делает ее непригодной для хозяйственной деятельности, губительно влияет на растения, животных и микроорганизмы. Рекультивация загрязненных земель – трудоемкий и затратный процесс, в некоторых случаях осложняемый неоднородным растительным покровом, грунтами с высокой нефтеемкостью, крутым рельефом или обилием твердых пород, не позволяющих производить рекультивацию. При попадании разлившейся нефти в водоемы загрязнение распространяется на большие расстояния вследствие диффузионных процессов.

Целью данной публикации является анализ существующих методов прогнозирования аварийных разливов нефти на суше, разработка комбинированного алгоритма расчета конфигурации нефтяного загрязнения с последующим трехмерным моделированием аварийных разливов нефти на магистральных нефтепроводах на языке Python и отображением результатов в ГИС ArcGIS for Desktop.

В качестве объекта исследования выбраны магистральные нефтепроводы Республики Башкортостан. Урало-Сибирский регион, в частности Республика Башкортостан, относится к наиболее значимым нефтедобывающим регионам России. В 2008 г. в республике на трубопроводный транспорт приходилось 70.5 % грузооборота. По состоянию на октябрь 2015 г. протяженность нефтепроводов и нефтепродуктопроводов составляет порядка 5000 км [1]. В рассматриваемом регионе случались прецеденты аварийных ситуаций, связанных с нефтепроводами. Например, 3 июня 1989 г. около деревни Улу-Теляк (Башкортостан) произошел разрыв трубы продуктопровода, и свыше 4 тыс. т углеводородной смеси заполнило долину вдоль полотна железной дороги Аша–Уфа [2]. Важность предотвращения подобных аварий подчеркивает необходимость разработки дополнительных инструментов прогнозирования аварийных ситуаций.

Аварийные разливы нефти на магистральных трубопроводах. В России 99 % нефти транспортируется посредством нефтепроводов. Нефтепроводы представляют собой комплексы сооружений для транспортировки нефти и продуктов ее переработки от места их добычи или производства к пунктам потребления или перевалки.

Скорость движения нефти в трубопроводе составляет 10...12 км/ч. К частям нефтепроводов, наиболее подверженным механическим повреждениям, относятся клапаны, фитинги трубопровода, насосные станции, а в особенности прокладки, сальники и фланцы [3].

При нарушении целостности трубопровода выделяются следующие стадии аварийного истечения нефти:

1. Стадия «напорного» истечения, происходящая от момента аварии до момента отключения перекачивающей станции. Эта стадия характеризуется истечением нефти (или нефтепродукта) через образовавшееся отверстие при работе перекачивающей станции. Как правило, в этот период давление в месте аварии незначительно меняется во времени, и количество вытекшей жидкости можно определить исходя из разности давлений снаружи и внутри трубопровода в месте аварии, площади отверстия и продолжительности истечения.

2. Стадия «безнапорного» истечения после отключения перекачивающей станции до перекрытия

линейных задвижек, изолирующих поврежденный участок от остальной части трубопровода.

3. Стадия безнапорного истечения от перекрытия линейных задвижек до ликвидации аварии (или полного опорожнения трубопровода).

Во второй и третьей стадиях жидкость вытекает через отверстие под действием силы тяжести. При этом в наивысших точках трубопровода последовательно, один за другим, происходят разрывы плотности потока, и в этих местах образуются полости, заполняемые насыщенными парами нефти (или нефтепродуктов), в которых давление равно упругости паров нефти.

Процесс истечения заканчивается либо тогда, когда авария ликвидируется (восстанавливается герметичность трубопровода), либо когда прекращается вытекание нефти из отверстия. Это происходит, когда давление внутри трубы в месте аварии выравнивается с атмосферным.

Для расчета суммарного количества нефти, вылившейся из трубопровода, выделяются три этапа, которые характеризуются разными режимами истечения и соответствуют обозначенным стадиям [4].

Объем V_1 нефти, вытекшей из нефтепровода с момента T_a возникновения аварии до момента T_0 остановки перекачки, определяется соотношением

$$V_1 = Q_1 T_1 = Q_1 (T_0 - T_a),$$

где Q_1 – расход нефти через место повреждения с момента возникновения аварии до остановки перекачки, м³/ч. Время повреждения T_a и остановки T_0 насосов фиксируется системой автоматического контроля режимов перекачки.

Расход нефти через место повреждения Q_1 определяется из выражения

$$Q_1 = Q' - Q_0 \times \left\{ \frac{1}{(l - x^*) \left[Z_1 - Z_2 + \frac{(P' - P'')}{\rho g} - i_0 x^* \left(\frac{Q'}{Q_0} \right) (2 - m_0) \right]} \right\} \times \left(\frac{1}{2} - m_0 \right),$$

где Q_0 – расход нефти в исправном нефтепроводе при работающих насосных станциях, м³/ч; l – протяженность участка нефтепровода, заключенного между двумя насосными станциями, м; m_0 – показатель режима движения нефти по нефтепро-

воду в исправном состоянии; i_0 – гидравлический уклон при перекачке нефти по исправному нефтепроводу; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 .

Расход нефти в исправном нефтепроводе при работающих насосных станциях Q_0 определяется режимом загрузки нефтепровода и фиксируется по показаниям приборов на нефтеперекачивающих станциях (НПС). Протяженность поврежденного участка нефтепровода, заключенного между двумя НПС, протяженность участка нефтепровода от НПС до места повреждения x^* , геодезические отметки начала Z_1 и конца Z_2 участка определяются по профилю трассы нефтепровода. Расход Q' , давление в начале P' и в конце P'' участка в поврежденном нефтепроводе при работающих НПС определяются по показаниям приборов на НПС на момент аварии [4].

На основании вышеизложенной методики были определены потенциальные объемы нефти, выливающиеся из нефтепровода при аварии.

Анализ методов моделирования нефтяных разливов. В ходе работы были рассмотрены основные существующие методы моделирования аварийных разливов нефти на суше. С учетом значительной протяженности нефтепроводов методы базируются на использовании геоинформационных систем. Основные подходы к решению задачи моделирования распространения нефти по рельефу.

Аппроксимация уравнения неразрывности методом конечных разностей. Для общей оценки характеристик поверхностного стока нефти может быть использована модель, предложенная в статье В. Г. Гитиса, Е. Н. Петрова и др. [4].

Жидкость, находящаяся в неравновесном состоянии, стремится выровнять свой поверхностный уровень под действием силы тяжести и гидростатического давления. Для описания движения потока жидкости при отсутствии внешних источников используется дифференциальная форма уравнения неразрывности несжимаемой жидкости

$$\operatorname{div}(\mathbf{j}) = -\frac{\partial h}{\partial t},$$

где $\operatorname{div}(\mathbf{j}) = \partial j_x / \partial x + \partial j_y / \partial y$; \mathbf{j} – вектор потока жидкости, значение которого равно объему воды, протекающему за единицу времени через прямоугольную площадку; направление потока $\mathbf{j} = \lambda v$ совпадает с направлением скорости движения жидкости v [4].

Численное решение уравнения, основанное на разностной аппроксимации правой его части, и наложение на рассматриваемую территорию сетки с квадратной ячейкой позволяют последовательно вычислить конфигурации поля $H = H(x, y, t)$ для дискретных точек пространственно-временной сетки:

$$H_{x,y}(t + \tau) = H_{x,y}(t) - \frac{\tau \lambda \rho g}{m d^2} \times \left[\begin{aligned} & \left[\min \left(d |\nabla H_{x,y}|, \frac{c d m}{\lambda \rho g} h_{x+1,y} \right) \frac{H_{x+1,y} - H_{x,y}}{d |\nabla H_{x+1,y}|} \right] \\ & + \left[\min \left(d |\nabla H_{x,y}|, \frac{c d m}{\lambda \rho g} h_{x-1,y} \right) \frac{H_{x-1,y} - H_{x,y}}{d |\nabla H_{x-1,y}|} \right] \\ & + \left[\min \left(d |\nabla H_{x,y}|, \frac{c d m}{\lambda \rho g} h_{x,y+1} \right) \frac{H_{x,y+1} - H_{x,y}}{d |\nabla H_{x,y+1}|} \right] \\ & + \left[\min \left(d |\nabla H_{x,y}|, \frac{c d m}{\lambda \rho g} h_{x,y-1} \right) \frac{H_{x,y-1} - H_{x,y}}{d |\nabla H_{x,y-1}|} \right] \end{aligned} \right],$$

где τ – шаг времени; λ – высота движимого слоя жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; m – некоторый коэффициент пропорциональности; d – шаг сетки; c – средняя скорость потока.

К недостаткам данной модели относятся необходимость дополнительного учета фильтрации жидкости в грунт и испарения, а также, экспериментально подтвержденная необходимость равномерного покрытия поверхности некоторым слоем жидкости для правильной работы алгоритма, что не предполагается в исследуемой задаче, а оптимизация сильно усложняет алгоритм.

Метод моделирования, основанный на решении однокоординатных уравнений вдоль известных направлений стока. Согласно этому методу определяются русло потока жидкости и аккумулирующая способность элементов модели рельефа.

Динамическая ось потока (русло потока) определяется методом градиентного спуска для каждой расчетной точки матрицы рельефа. Ширина русла потока жидкости зависит как от интенсивности аварийного выброса, времени истечения и реологических свойств жидкости, так и от гидравлического уклона местности, сорбционных свойств почвы (грунта). Неустановившееся движение жидкости по рельефу местности описывается уравнением неразрывности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho_{\text{ж}} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dx + \frac{\partial h_{\text{ф}}}{\partial t} n_e \rho_{\text{гр}} + q_{\text{исп}} = 0,$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{гр}}$ – плотности жидкости и грунта, кг/м³; $h_{\text{ф}}$ – глубина фильтрации жидкости в грунт (почву), определяемая по уравнению диффузии; n_e – нефтеемкость грунта, м³/м²; $q_{\text{исп}}$ – интенсивность испарения вещества с поверхности, кг/(м²с), определяемая в соответствии с методологией, изложенной в [5]; ϑ – скорость течения жидкости в направлении динамической оси потока (в русле потока), определяемая по уравнению Шези:

$$\vartheta = C \sqrt{R_{\text{г}} i},$$

где C – коэффициент Шези, зависящий от свойств поверхности грунта, $R_{\text{г}}$ – гидравлический радиус потока жидкости, определяющий ширину русла потока, м, i – гидравлический уклон рельефа местности [5].

Недостаток данной модели заключается в необходимости дополнительных данных – линий максимальных градиентов и изолиний рельефа, а также в необходимости определения гидрологических характеристик потока. Преимущество модели – в том, что в ней учитываются фильтрация в грунт и испарение.

Использование встроенных инструментов среды ArcGIS. К решению задачи также можно подойти с точки зрения использования встроенных инструментов ArcGIS for Desktop. Модуль Spatial Analyst предлагает инструменты гидрологии, позволяющие определить направления стока.

В ArcGIS for Desktop реализован алгоритм направления стока Deterministic Eight Neighbor (D8) [6]. В соответствии с ним поток из рассматриваемой ячейки целиком направляется в ту из восьми соседних, которая имеет, во-первых, меньшую высоту и, во-вторых, наибольший уклон линии, соединяющей центр ячейки с центром соседней. Выходные данные инструмента «Направление стока» представлены целочисленным растром, значения которого находятся в диапазоне от 1 до 255.

На основе раstra направления потока формируется растр суммарного стока (инструмент «Суммарный сток», Flow Accumulation), каждая ячейка которого определяется как сумма весов для всех ячеек, которые стекают в каждую ячейку, расположенную вниз по склону.

Суммарный сток основывается на количестве ячеек, из которых осуществляется сток в каждую конкретную ячейку в выходном растре. Ячейка, которая обрабатывается в текущий момент времени, не учитывается в сумме. Выходные ячейки

с высоким суммарным стоком – это участки концентрированного стока; они могут быть использованы для определения русел водотоков. Выходные ячейки с суммарным стоком, равным нулю, – это локальные топографические пики; они могут быть использованы для выделения хребтов или линий водораздела. Русло потока жидкости выделяется посредством задания порогового значения водосборной площади.

Недостаток такого метода в контексте настоящего исследования заключается, прежде всего, в его глобальности, – он более применим для оценки гидрологических характеристик речной сети. В то же время, выходные данные характеризуют установившийся режим движения жидкости, в случае нефтяного разлива речь идет о неустановившемся режиме, что и представляет наибольшие трудности при моделировании.

Рассмотренные методы моделирования имеют свои преимущества и недостатки. Специфика аварийных разливов, состоящая в том, что поведение растекающейся жидкости, наряду с ее свойствами и действием закона тяготения, будет обусловлено рельефом, составом грунтов, климатическими условиями, требует разработки комплексного алгоритма.

Комбинированный алгоритм моделирования аварийных разливов нефти. Целью исследования служит построение алгоритма, оптимального с точки зрения минимизации времени обработки данных, с математической моделью, учитывающей условия местности (рельеф, наличие естественных и искусственных сооружений), а также такие процессы, происходящие с нефтью, как испарение и фильтрация в почву.

С использованием доступных данных в ArcGIS Desktop реализована карта основных направлений нефтепроводов Республики Башкортостан (рис. 1), служащих потенциальными источниками нефтяного загрязнения.

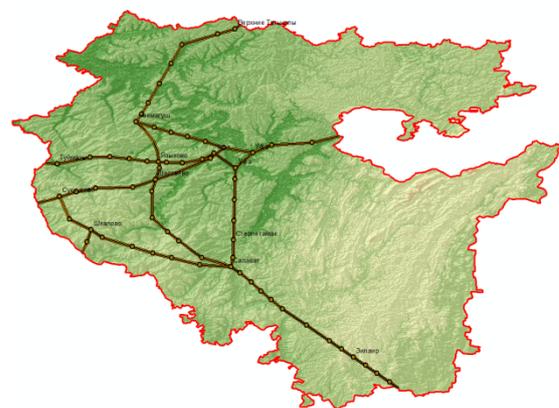


Рис. 1

Исходными данными алгоритма моделирования служат геоданные, представляющие собой сетку высот рельефа местности, в соответствии с которой нужно моделировать нефтяной разлив [7]. Также к исходным данным относится объем разлива, его координаты, дополнительные характеристики (плотность нефти, коэффициент нефтеемкости грунта).

Результирующие данные представлены конфигурацией нефтяного разлива, отражающей распределение объемов нефти в ячейках раstra и позволяющей наглядно отобразить результаты на карте. Такая модель может быть применена для быстрой оценки потенциально опасных участков при аварийном разливе нефти.

Для построения трехмерной модели рельефа использованы результаты спутниковой радиометрии теплового излучения и отражения ASTER GDEM 2, представляющие собой сетку высотных отметок с шагом 30×30 м [8]. Алгоритм также может быть применен к другим данным, однако следует учитывать, что размер ребра сетки будет влиять на точность получаемого результата.

При построении комбинированного алгоритма за основу моделирования нефтяного разлива взят алгоритм D8, который используется в инструментах гидрологии Spatial Analyst, однако в соответствии с поставленной задачей моделирование ведется относительно заранее известных координат разлива с заранее известным объемом вылившейся нефти.

Предположим, что аварийный разлив занимает одну ячейку раstra высот. Для соседних 8 ячеек находим разницу высот центральной ячейки с соседними с учетом уровня жидкости. Если высота соседней ячейки больше, то жидкость в данном направлении не течет; для остальных ячеек находим сумму разностей и определяем коэффициенты уклона для всех соседних ячеек. В соответствии с найденными коэффициентами распределяем некоторый элементарный объем жидкости. Таким образом, от рассматриваемой ячейки отнимаем этот элементарный объем:

$$h_0(t + \tau) = h_0(t) - \Delta h. \quad (1)$$

К соседним восьми ячейкам прибавляем ту часть этого объема, которая соответствует крутизне склона в данном направлении:

$$h_k = h_k + \frac{\Delta h(H_0 - H_k)}{\sum_{k=1}^8 (H_0 - H_k)}, \quad (2)$$

где $H_0 - H_k > 0$. При нулевом или отрицательном значении крутизны эта разность принимается равной нулю.

Заданный объем преобразуем в единицы высоты (уровня) жидкости для более удобной реализации алгоритма в соответствии с используемым размером сетки раstra высот:

$$h_0 = \frac{V}{d^2}, \quad (3)$$

где V – заданный объем разлива; d – шаг сетки.

Элементарный объем жидкости Δh , вытекающий из ячейки за единицу времени, зависит от плотности нефти, ускорения свободного падения, ребра ячейки и некоторого значения λ , характеризующего высоту слоя жидкости, которую предполагаем движимой. В то же время эта величина характеризует минимальную высоту уровня жидкости на поверхности грунта, при достижении которой можно считать, что дальнейшего растекания нефти не будет происходить:

$$\Delta h = \frac{\rho_n g \lambda}{d^2}. \quad (4)$$

Экспериментально подтверждено, что эта величина должна быть много меньше начального уровня жидкости в ячейке, где произошел разлив [4]. Исходя из значения λ и объема вылитой нефти определяется предполагаемое время моделирования, так, чтобы нефть перешла в равновесное состояние и высота ее уровня нигде не превышала λ (за исключением локальных понижений, которые могут аккумулировать нефть).

Для более наглядного представления результирующей конфигурации разлива полученное распределение уровней жидкости в ячейках суммируется со значениями высот и результатом становится распределение абсолютных высот уровня жидкости.

Явление просачивания нефти в почву учитывается методом умножения объемов нефти на заданный коэффициент нефтеемкости грунта. Объем впитавшейся нефти зависит от площади конечной конфигурации разлива и средней глубины пропитывания. Для рассмотренного примера, анализируя карту почв, можно определить коэффициент нефтеемкости грунта как 0.4 (суглинистый грунт), средняя глубина пропитки земли нефтью – 0.05 м.

Таким образом, формируется следующий алгоритм моделирования:

1. На вход принимается набор растровых данных, соответствующих высотам местности, координаты предполагаемого места аварии нефтепровода и объем вылившейся нефти.

2. С целью экономии вычислительных ресурсов массив ограничивается квадратной областью, охватывающей предполагаемую площадь разлива с центром в точке разлива; в случае необходимости (при больших объемах разлива или сложном характере рельефа) эта площадь может быть увеличена.

3. Набор растровых данных преобразуется в массив для дальнейшей обработки.

4. Определяется начальная высота уровня жидкости в точке разлива, полученная из объема разлива и площади элементарной ячейки согласно (3).

5. Определяется скорость истечения нефти за элементарный интервал времени из ячейки, выраженная в единицах изменения высоты уровня жидкости по формуле (4).

6. В соответствии с заданным временем моделирования реализуется алгоритм D8, вычисляется конфигурация разлива с использованием выражений (1), (2). Время моделирования носит

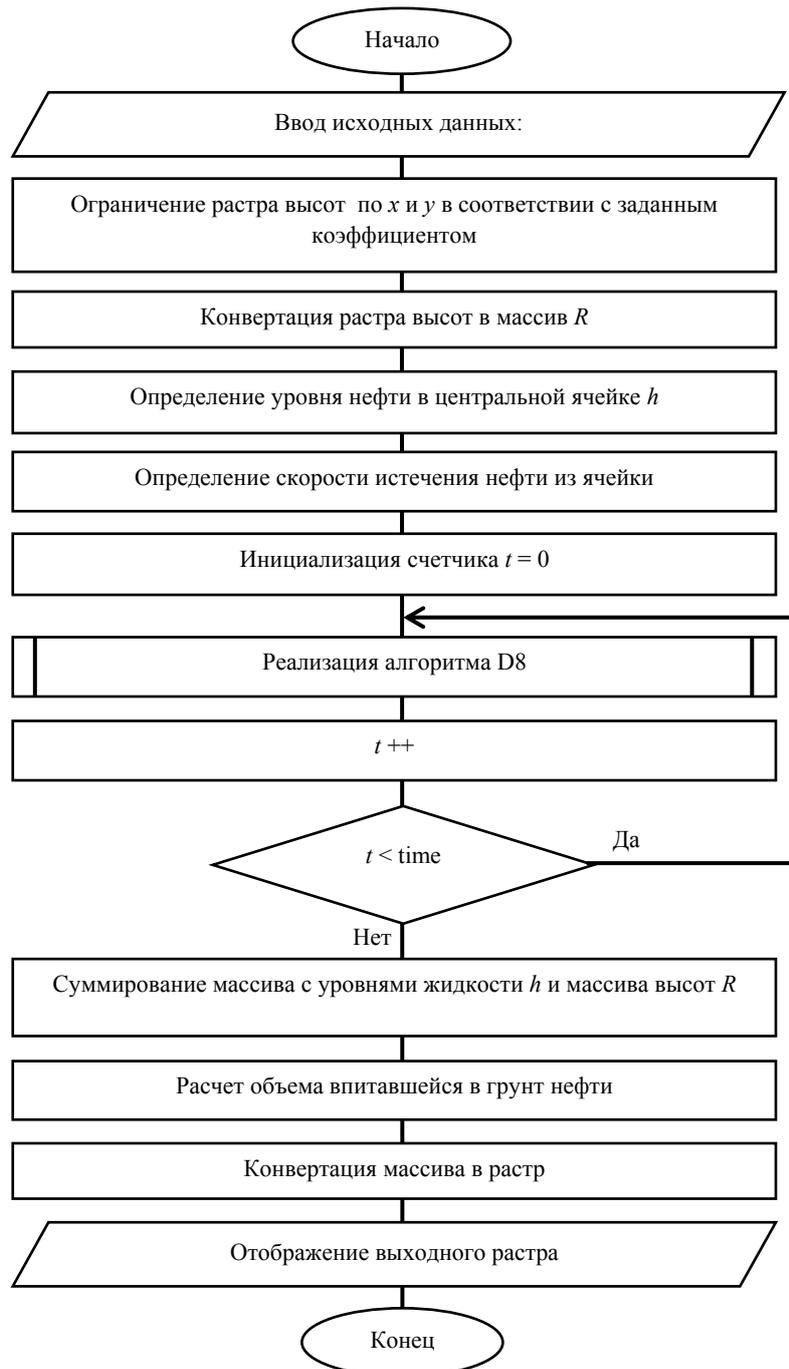


Рис. 2

условный характер и может не соответствовать реальному времени распространения нефти, оно лишь характеризует количество итераций алгоритма и должно быть выбрано достаточно большим, чтобы жидкость перешла в равновесное состояние, – тогда конфигурация поля растекания может считаться конечной (с допущением минимального движимого слоя).

7. Суммируются массив с уровнями жидкости h и массив высот R для более наглядного представления результата.

8. Рассчитывается объем нефти, впитавшейся в грунт, в соответствии с заданным коэффициентом нефтеемкости грунта и площадью конфигурации разлива.

9. Полученный массив данных, характеризующий распределение абсолютных уровней жидкости в элементах рельефа, конвертируется в набор растровых данных

10. Полученный набор растровых данных импортируется в ArcGIS для дальнейшей визуализации.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Для программной реализации алгоритма использовался язык программирования Python. Среда ArcGIS предполагает использование данного языка для разработки дополнительных модулей скриптов. Реализован скрипт, применяемый к растровым данным ArcGIS (интерфейс скрипта в ArcGIS – на рис. 3). Для корректной работы скрипта необходимо настроить параметры геообработки соответствующим образом: разрешить

перезапись данных, установить экстенд геообработки таким образом, чтобы он охватывал местность предполагаемого разлива нефти.

В интерфейсе скрипта задаются следующие параметры:

– inRaster – входной набор растровых данных высот;

– SplitX, SplitY – координаты предполагаемого места разлива в десятичных градусах;

– ClipRate – показатель, определяющий область растра в окрестности координат разлива, которая будет использована для расчета (определяет долю входного растра, может принимать значения от 0 до 1). Чем меньше этот показатель, тем быстрее производится расчет, однако площадь не должна быть меньше предполагаемой области разлива;

– Time – количество итераций алгоритма;

– Volume – общий объем нефти, вытекшей при аварии из нефтепровода, m^3 ;

– OilDensity – плотность нефти, по умолчанию $855 \text{ кг}/m^3$;

– Lambda – толщина верхнего слоя нефти, которая считается движимой при моделировании. Уменьшение этого параметра требует соответствующего увеличения параметра time и должно быть мало по сравнению с начальной высотой разлива;

– Kn – коэффициент нефтеемкости грунта, m^3/m^2 , определяемый по таблице; если учета фильтрации нефти в грунт не требуется, оставить пустым.

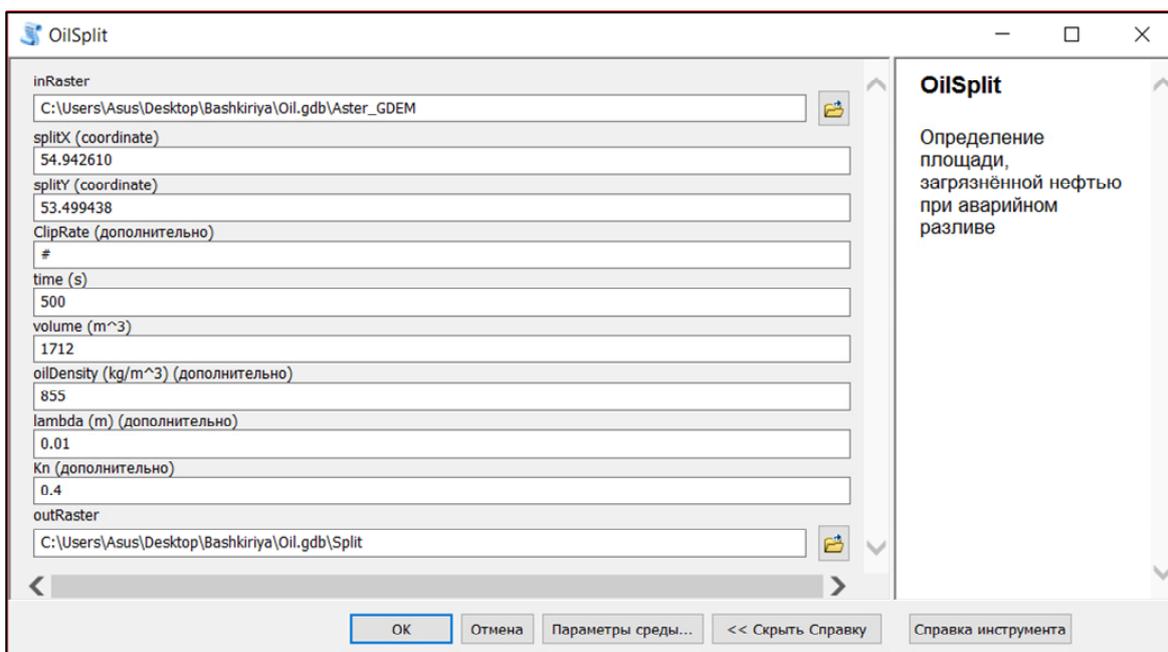


Рис. 3



Рис. 4

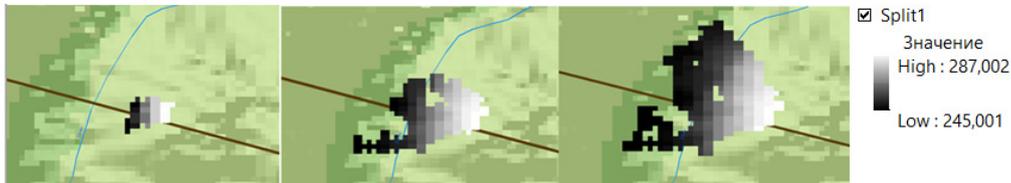


Рис. 5

В результате работы программы формируется след нефтяного загрязнения в виде растрового слоя, наносимый на карту в ArcGIS for Desktop. Результат моделирования с различными начальными параметрами представлен на рис. 4, 5. На рис. 4 слева направо показаны результаты моделирования разлива 800, 1700, 3500 м³ нефти; на рис. 5 – разлива 1700 м³ нефти с параметром λ , равным 0.01; 0.001; 0.0001 м соответственно.

Анализ результатов моделирования показал, что сумма объемов нефти в ячейках раstra различных высот сходится с начальным объемом, что подтверждает адекватность модели, а также что площадь загрязнения, полученная при моде-

лировании соизмерима с площадью, указанной в примере из нормативных рекомендаций [9]. Часть нефти достигла реки, что может привести к распространению загрязнения вдоль течения. Необходимо принять меры по недопущению распространения нефти в этом направлении.

Результаты работы алгоритма и реализованная программа могут применяться для выявления наиболее опасных участков нефтепровода, определения наиболее вероятных направлений распространения аварийных разливов в чрезвычайных ситуациях с целью их предотвращения и оптимизации работ по ликвидации последствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АО «Транснефть – Урал». История. URL: <https://ural.transneft.ru/about/activity/history> (дата обращения 07.09.2019).
2. Википедия. Железнодорожная катастрофа под Уфой. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой/ (дата обращения 07.09.2019).
3. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М.: Ин-октаво, 2005.
4. Математическое моделирование поверхностного стока и переноса загрязнений / В. Г. Гитис, Е. Н. Петрова, С. А. Пирогов, Е. Ф. Юрков // Информационные процессы. 2007. Т. 7, № 2. С. 168–182.
5. Кутуков С. Е., Павлов С. В. Имитационный метод ранжирования участков трубопровода по экологической опасности аварийных разливов // Нефтегазовое дело. 2001. № 2. С. 101–110.
6. Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. Vol. 54, № 11. P. 15931–600.
7. Myshko R. A., Kurakina N. I., Kovchik V. S. Geoinformational generalized flow formation model for solving problems of prognostication and emergency prevention / Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. St. Petersburg: Institute of electrical and electronics engineers, 2019. P. 1314–1317.
8. USGS. ASTER Global DEM. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 07.09.2019).
9. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Минтопэнерго РФ. М.: Транспресс, 1996.

N. I. Kurakina, P. A. Myshko A
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

LANDSCAPE MODELING OF OIL EMERGENCY SPILLS USING GIS

In the work, the properties and behavior of oil spills accidents at oil pipelines are investigated. The analysis of the main stages of an land oil spill was carried out, the total amount of oil spilled from the pipeline and the factors affecting the initial volumes of oil spills were estimated. Existing methods for modeling the spread of oil spills are considered taking into account the topography; a combined algorithm for calculating the oil pollution configuration was developed, followed by software implementation as Python script and displaying the results on thematic maps in ArcGIS for Desktop. The questions of the influence of the phenomena of evaporation and oil filtration on the spill configuration are investigated and the adequacy of the model is evaluated. Possible modeling oil spills at the oil pipelines of the Republic of Bashkortostan were selected as an example of modeling, since the Republic of Bashkortostan is one of the most significant oil producing regions of Russia. The results of the algorithm and the implemented program can be used to identify the most dangerous sections of the pipeline, determine the most likely directions for the spread of emergency spills in emergency situations in order to prevent them and optimize the work on eliminating the consequences.

Mathematical modeling, pollution, oil spills, oil products, geoinformational systems, analysis, ArcGIS for Desktop

УДК 519.816:655.1

А. В. Иванов

Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений

В. В. Ваганов

Высшая школа автоматизации и робототехники

Н. А. Билецкий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Разработка алгоритма динамического планирования полиграфического производства посредством рейтинговой системы

Динамическое планирование оперативного полиграфического производства позволяет автоматизированно создавать план производства в режиме реального времени с помощью алгоритма, базирующегося на методе приоритетных правил. На основе данного метода строится рейтинговая система заказов, определяющая очередность их запуска в работу на каждом отдельном этапе производства. Данный алгоритм позволяет исключить человеческий фактор при планировании потока заказов на производстве, где из-за оперативности выполнения работ невозможно применять статическое планирование. С помощью гибкой системы выбора приоритетных правил данная разработка позволяет размещать заказы в порядке необходимости их выполнения на каждом из этапов производства в зависимости от многих параметров заказа. Рассчитывается минимально необходимое время выполнения заказа, минимальный срок выполнения заказа с учетом загруженности оборудования в настоящий момент времени, учитывается желаемый срок изготовления продукции.

Динамическое планирование, автоматизация производства, полиграфия, управление предприятием, рейтинговая система, метод приоритетных правил

Полиграфическое производство характеризуется большой номенклатурой выпускаемой продукции и разнообразием применяемых техноло-

гий ее изготовления. Адаптация к требованиям рынка и дифференциация спроса приводят к существенным колебаниям производственно-техни-