

УДК 502.1/2:656

И. В. Липатов,
д-р техн. наук, профессор,
ФБОУ ВПО «Волжская государственная
академия водного транспорта»;

А. Е. Пластинин,
канд. техн. наук, доцент,
ФБОУ ВПО «Волжская государственная
академия водного транспорта»

ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

EVALUATION HYDRODYNAMIC CONDITIONS IN DURING LIQUIDATION OF OIL SPILLS

Обоснована необходимость решения трехмерных уравнений Навье–Стокса численным методом для расчета гидродинамических условий при разливах нефти. Приведен пример решения этой задачи для участка аварийности транспортных судов на реке Волге. Разработан комплекс матриц локализации и ликвидации разливов нефти.

The article substantiates the necessity solving three-dimensional equations Navier-Stokes using numerical method of calculating the hydrodynamic conditions in the case of oil spills. An example is given to solve this task for transport vessels at the site of accident on the Volga River. Complex matrixes are engineered for localization and liquidation of oil spills.

Ключевые слова: разлив нефти, ликвидация, локализация, гидродинамические условия, уравнения Навье–Стокса, матрицы.

Key words: oil spills, liquidation, localization, hydrodynamic conditions, equations Navier-Stokes, matrixes.

В НАСТОЯЩЕЕ время сохраняется высокий уровень риска возникновения чрезвычайных ситуаций, сопряженных с разливами нефти (ЧС(Н)) на объектах водного и трубопроводного транспорта на внутренних водных путях (ВВП). Практика локализации и ликвидации рассматриваемого вида ЧС свидетельствует о недостаточной эффективности этого вида деятельности в условиях ВВП в рамках Единой государственной системы по предупреждению и ликвидации ЧС природного и техногенного характера [1, с. 152–157; 2, с. 130–135; 3, с. 129–135].

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС(Н) является соответствие организации и технологии ответных действий при разливе нефти (РН) гидродинамическим условиям, в которых необходимо выполнять работы по локализации и ликвидации РН (ЛРН) на водном объекте.

В связи с этим необходимым условием решения данной проблемы является совершенствование методологии прогнозирования и оценки гидродинамических факторов, что позволит повысить точность моделирования РН, обеспечит выбор эффективных рубежей локализации и тактики реагирования.

Действительно, в речных турбулентных потоках с высокими скоростями течения увеличивается интенсивность большинства процессов, происходящих в нефтяном пятне (растворение нефти, естественная дисперсия (рассеивание), эмульгирование, увеличение вязкости, эффект уноса нефти под плавающее боновое ограждение (при скорости более 0,3 м/с), диффузия, осаждение нефти (за счет неровного дна и наличия точек сжатия потока, бурного перемешивания и увеличения контакта нефти с водой)).

Гидродинамические условия (скорость течения и интенсивность турбулентности) определяют выбор стратегии и тактики ЛРН. Например, скорость течения увеличивается в глубоководных частях рек и понижается с уменьшением глубины около берега из-за эффекта трения со стороны дна и особенностей формирования пространственной кинематической структуры потока. Поэтому нефть будет следовать сообразно основному направлению доминирующего вектора скорости течения реки. В дальнейшем из-за активизации турбулентных касательных напряжений, шлейф нефти получает тенденцию к дрейфу в области малых скоростей поверхностного речного потока. Определяющим фактором кинематической структуры на поверхности реки является характер уровня режима на конкретном участке реки, а также наличие дополнительных техногенных воздействий (сбросы через плотины, попуски ГЭС, дополнительная боковая приточность и т. д.). Таким образом, даже в пределах навигации места нефтесбора и технология ЛРН меняются. При этом на реках сборное оборудование в основном закрепляется на берегах рек или располагается на акватории [4; 5].

На больших реках используется комбинация стационарного и самоходного нефтесборного оборудования. Необходимо учитывать осадки судов и оборудования при работе на мелководье.

Ниже приведены характерные особенности рек, влияющие на выбор стратегии и тактики ЛРН.

1. Эродированные участки формируются на берегах, где течение изменяет направление. Они используются как естественные точки сбора.

2. Течение реки имеет тенденцию к формированию каналов с быстрым течением на внешней стороне изгибов реки. Очень часто берега в этих местах крутые, в то время как внутренняя часть часто пологая с песчаными берегами и малыми скоростями. Нефть отклоняется в зоны с малыми скоростями течений (внутри изгиба реки).

3. Места впадения притоков в главную реку часто вызывают перекрестное течение, увеличивающее скорость основного течения. Отклонение и задержание нефти производится выше по течению от точки впадения, где скорость, как правило, ниже. Обычно ниже и выше места впадения существуют водовороты, которые используются как естественные места сбора. Малые скорости течения притоков используются для сбора отклоненной нефти в том случае, если они не являются приоритетными зонами.

4. Острова вызывают сжатие течения реки, которое обычно приводит к повышению скорости вокруг острова. Нефть должна быть собрана и задержана до или после таких мест. Очень часто на нижней по течению части острова формируются возвратное течение и водовороты. Здесь используется оборудование, работающее на малых скоростях течения.

5. Искусственные объекты (пирсы, пристани и т. д.) улавливают нефть и очень затрудняют ее сбор. Нефть отклоняется от таких конструкций. Облицовка берегов из камня или бетона затрудняет закоривание и в случае загрязнения нефтью трудно очищается. Ил и песок собираются позади запруд в водоворотах, плавающая нефть может собираться там же. Работающие около песчаных преград позади островов и запруд должны быть предупреждены о том, что преграда может быть нестабильной и не выдержать вес людей и оборудования. Дамбы и шлюзы могут быть использованы как точки сбора нефти, но высокая скорость поступления воды часто требует, чтобы они оставались открытыми для предотвращения затопления берегов и преград.

Таким образом, ЛРН необходимо производить в зонах пониженных скоростей и турбулентности: внутренний радиус изгиба речного русла, ответвления потока в более низкое русло, старицы, водовороты в нижних оконечностях островов, застойные водоворотные зоны и т. д.

Гидродинамические условия определяют количество и тип боновых ограждений, нефтесборных устройств и другого оборудования для ЛРН с точки зрения эффективности их работы.

Большинство оборудования ЛРН по принципу работы на скоростях течения делится на оборудование, эффективно работающее при скоростях до 0,5, от 0,5 до 1, от 1 до 1,5 м/с [4; 5].

Следует отметить, что оценка гидродинамических условий связана с многочисленными трудностями научно-методического характера: обширная география местоположения возможных

источников ЧС(Н); широкие диапазоны изменения гидрометеорологических условий; значительное количество сценариев ЧС(Н) и т. п.

Для описания движения реальных турбулентных потоков (в том числе речных) в XIX в. было предложено уравнение Навье–Стокса. Учитывая невозможность его полного решения для пространственного случая в XIX — середине XX в., применительно к различным предметным областям (прикладным задачам) рядом ученых предлагались различные упрощения и модификации, гипотетически приемлемые в каждом конкретном случае. Например, для водных речных сред не учитывалось изменение плотности воды от давления и температуры. К тому же в гидродинамике исторически пользовались понятием «турбулентные напряжения». Это обстоятельство в совокупности с интересом к осредненным по времени характеристикам подвигло Рейнольдса к выводу своей более упрощенной системы гидродинамических уравнений.

В результате, помимо базовых искомых кинематических характеристик — скорости и давления, в уравнении стали фигурировать нормальные и касательные напряжения, действующие в каждой точке. Учитывая, что турбулентные напряжения в потоке (согласно гипотезе Рейнольдса) связаны со скоростью через первую производную, появилась возможность математически упростить изначальную систему гидродинамических дифференциальных уравнений в аналитическом виде и тем самым приблизиться к частным конкретным решениям.

Наиболее удачной адаптацией полных уравнений Навье–Стокса для решения задачи о распространении волн половодья по речному руслу была предложена в работах Сен-Венана, где волна половодья рассматривалась как одномерная с обязательным наличием свободной границы. Помимо этого, были введены дополнительные физические допуски и достаточно грубые (применительно к речным потокам) геометрические упрощения. Отчасти это позволило начать считать волновые задачи, и в речной гидродинамике стали появляться реальные решения задачи о распространении волн половодья в руслах рек. Причем первые реальные решения получались методом ЭГДА (электродинамических аналогий, то есть аналогии математического описания движения тока в электрической цепи и движения волны половодья в реке).

Таким образом, уравнения Рейнольдса, а тем более уравнения Сен-Венана, являются вариантом упрощения изначальной системы Навье–Стокса. Если уравнения Рейнольдса позволяют учесть все нюансы геометрии речного потока, то уравнения Сен-Венана существенно упрощают как физическую сторону процесса, так и огрубляют геометрию потока. Это касается следующих моментов.

1. Согласно постулату Рейнольдса турбулентные напряжения связаны со скоростью и прямо пропорциональны второй производной от каждой компоненты скорости потока в точке. У Сен-Венана вторые производные вообще отсутствуют, а что касается учета наличия продольных и поперечных скоростей в каждой точке, то изначальный постулат от одномерности потока сводит ситуацию к абсурду. Естественно, когда речь идет о расчете длинного потока с постоянным поперечным сечением, когда интенсивность турбулизации равновесна во всех точках (под такие задачи и выводилось уравнение Сен-Венана изначально), то через поведение свободной поверхности можно подогнать коэффициент шероховатости (коэффициент валидации и полуобратным методом верифицировать модель). Но корректность результата при таком подходе вызывает вопрос. Окончательную неопределенность в перспективе использования уравнения Сен-Венана для решения задачи поверхностного течения возникает в случае наличия на поверхности льда. Свободная поверхность в этом случае отсутствует вообще. В то время как она является обязательной частью как начальных, так и граничных условий для системы Сен-Венана. В подледном состоянии речной поток «заперт» между дном и льдом и использование для описания его поведения волнового уравнения без свободной границы потребует внесения дополнительных допусков, корректность, которых вызывает большие сомнения (если, конечно, это в принципе возможно).

2. Кратко останавливаясь на геометрической аппроксимации русла, нужно учесть, что уравнения Сен-Венана «вытягивают» его в прямой канал с изменяющимся живым сечением русла, ввиду специфики вариационной формулировки задачи для последующего формирования матриц рас-

четных величин. Несмотря на полноценное отображение формы русла визуализатором, алгоритм формирования расчета, подчиняясь уравнению Сен-Венана, для расчетной процедуры существенным образом огрубляет исходные геометрические данные (работы акад. Марчука, проф. Милитева, Кучмента). Таким образом, природные мезоформы речного русла (меандры, отвесные берега, осередки перекаатов и пр.) аппроксимируются крайне приближенно. Методические исследования кафедры ВПиГС ВГАВТ, а также исследования BAW (немецкий Институт водного строительства) показывают, что поверхностная картина векторов течений существенно искажается.

3. Имеется еще ряд моментов, делающих неприемлемым использование уравнений Сен-Венана для моделирования поверхностных течений с целью определения динамики разлива нефти по поверхности реального речного потока.

Почти все существующие в настоящее время программы, применяемые в гидрологической и океанологической практике, используют алгоритмы решения уравнений Рейнольдса или Сен-Венана. При этом турбулентные характеристики отдельно не рассматриваются, они лежат в ядре программ — их правильное задание или определение обеспечивает верификацию (валидацию) модели.

Действительно, в гидрологической и океанологической практике более сложные уравнения Навье–Стокса применять целесообразно не всегда, хотя Мак-Кинзи (классик и первооткрыватель численного моделирования в области океанических и гидрологических течений) для своих расчетов всегда отталкивался от уравнений Навье–Стокса и в случае необходимости упрощения его до уравнений Сен-Венана очень строго обосновывал эти допущения.

При исследовании распространения нефтяных пятен приходится иметь дело с динамикой русловых потоков и моделированием реки на ограниченном участке. В связи с этим те допуски, что заложены в уравнение Сен-Венана, являются неприемлемыми. Это показывает и мировой опыт, и объективный, реальный анализ физической картины явления.

Необходимость в переходе к более сложным алгоритмам как раз и вызвана тем, что в уравнениях Сен-Венана всегда приходится подгонять результаты расчета под натурное положение кривой свободной поверхности с помощью коэффициента валидации. Поэтому для корректности решения задачи встает объективная необходимость в многократном снятии мгновенных связей уровней при различных отметках поверхности воды, поскольку даже при незначительном поднятии уровня, когда поток пойдет на пойму или начнет заполнять пересохшие протоки, эта величина начнет меняться не в разы, а в десятки раз, что иллюстрируют работы лаборатории почвенно-эрозионных процессов МГУ (в случае ледостава использование такого подхода в принципе вызывает сомнение).

Первоисточник этих некорректностей лежит в самой математической формулировке гипотезы Шези и последующих поисках коэффициента шероховатости или замыкающих коэффициентов (коэффициентов сопротивления русла) и пр. В разных пакетах эта процедура именуется по-разному, но суть одна: с помощью валидирующего коэффициента уравниваются все погрешности, связанные как с отсутствием корректного учета турбулентных членов, так и некорректности с геометрической аппроксимацией и пр. (см. работы А. Н. Кондратьева). Рассмотрение турбулентной характеристики по отдельности и наличие ее в ядре программ в совокупности с правильным заданием обеспечивает верификацию (валидацию) модели.

Все эти проблемы исчезают при решении трехмерных уравнений Навье–Стокса численным методом. Аппроксимация сетки максимально точно описывает пространственную геометрию потока со всеми нюансами (без огрублений, характерных для вариационной формулировки уравнений Сен-Венана). Корректность физической формулировки уравнений позволяет выполнять расчеты без всяких подгонок (валидации) и сразу выходить на корректный результат без дополнительных дополнительных многократных съемок связей мгновенного уровня.

Основным вопросом при исследовании растекания нефтяного пятна является плановое распространение последнего по поверхности реки. При этом турбулентные характеристики меняются не только по глубине, но и по ширине свободной поверхности. В прибрежной зоне они нарастают

от нуля с берега и интенсифицируются к середине потока, в случае прямого (линейного) русла. Для многорукавного потока (как это имеет место при низких и меженных уровнях в случаях оголения проток) влияние турбулизации (водоворотные и отрывные течения) становится доминирующим. В результате игнорирование вращательных компонент скорости (как это подразумевает уравнение одномерной волны Сен-Венана уже в своей изначальной формулировке) может привести к совершенно неожиданным результатам.

В качестве окончательных турбулентных характеристик k – ϵ гипотеза дает возможность анализировать величину турбулентной вязкости или коэффициента турбулентного обмена (более старое название). Величина этого коэффициента в свою очередь определяется через k — кинетическую энергию турбулентности и ϵ — диссипацию (распад) кинетической энергии. Таким образом, наличие значений коэффициента турбулентного обмена в каждой точке потока дает возможность оценить степень интенсификации процессов турбулизации потока в конкретной точке (области) потока.

Для моделирования турбулентности авторами предлагается использовать классический двухуровневый подход к определению осредненных компонент турбулентности (в конечном итоге нас интересует квазистационарное состояние речного потока). Суть его в том, что для описания турбулентности в прибрежных и придонных областях будут использоваться законы изменения турбулентных напряжений для пристеночных областей. В центральной области Потока, где мы имеем дело с активной развитой турбулентностью, будет использована Рейнольдсовская гипотеза турбулентности с последующей сшивкой решения по совпадающим величинам. Такой подход полностью оправдал себя при описании речной гидродинамики и активно используется в работе корпуса военных инженеров вооруженных сил США, Института проектирования на водном транспорте Германии (BAW) и пр.

Результаты ранее выполненных работ однозначно говорят о том, что полное пренебрежение вертикальными составляющими скоростей недопустимо. Если глубина потока в разы превышает неровности на дне, то некорректность отсутствует. Но если это низкие уровни, и глубина потока варьируется из-за изрезанности и многорукавности русла (что характерно для уральских и северных рек, а тем более при движении потока под льдом), то такое утверждение крайне спорно и опасно. Отчасти наличие такой точки зрения объясняется застоем российской науки и нежеланием признавать корректное математическое моделирование как таковое в совокупности с использованием максимально упрощенных математических моделей на базе уравнений Сен-Венана как «устоявшихся» и якобы безальтернативных.

В качестве примера в данной работе приведены результаты построения в системе *Pisces* поля течений и турбулентной характеристики на свободной поверхности (рис. 1, 2), а также береговой черты для участка аварийности транспортных судов 958–978 км реки Волги, полученные на трехмерной пространственной модели речного потока на базе решения системы уравнений Навье–Стокса и замыкаемых k – ϵ гипотезой турбулентности.

Определение границ зоны моделирования поверхностных течений выполнялось на основе результатов предварительного прогнозирования разлива нефти и включало несколько этапов, представленных на рис. 3.

На основе мирового опыта локализации и ликвидации РН созданы специальные матрицы выбора типов боновых ограждений, нефтесборных устройств и других средств борьбы с РН в зависимости от условий сбора нефти [4; 5]. Они показывают применимость каждого базового типа средств борьбы для сбора и задержания различных видов нефтепродуктов (легких нефтепродуктов, нефти средней вязкости и тяжелого топлива) при различных состояниях акватории и эксплуатационных условиях, включая мусор и лед.

На базе указанных матриц и полученных результатов были разработаны гидрологически ориентированные матрицы ЛРН (на примере участка аварийности транспортных судов 959 км реки Волги в районе затона «Память Парижской коммуны»). Последний РН здесь был зафиксирован 21 ноября 2013 г.



Рис. 1. Поле течений

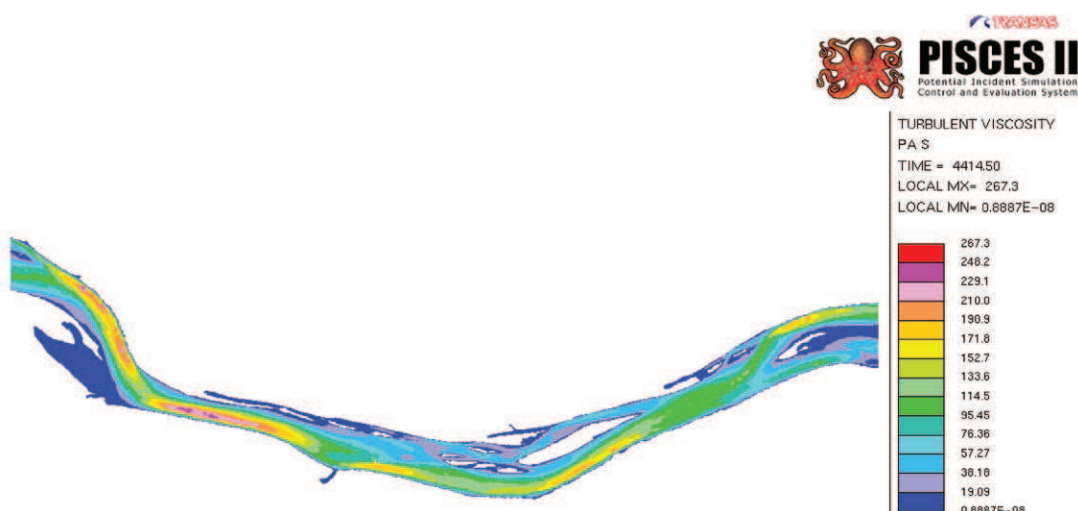


Рис. 2. Турбулентная характеристика

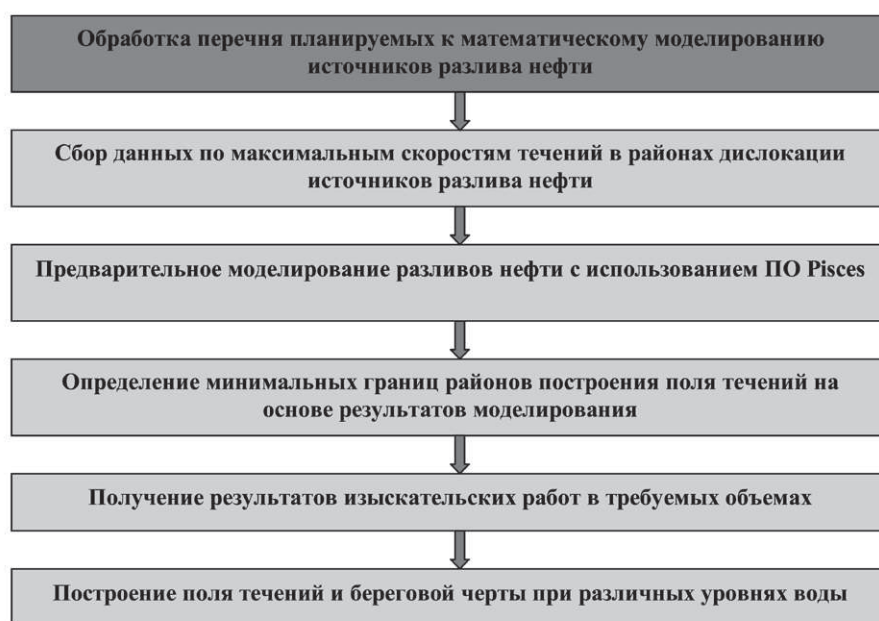


Рис. 3. Последовательность определения границ зоны моделирования поверхностных течений

В табл. 1 приведена матрица для определения угла постановки боновых заграждений в зависимости от скорости течения в отдельных зонах рассматриваемого участка аварийности.

В табл. 2 представлена матрица выбора передвижных скиммеров, где в зависимости от скорости течения показана целесообразность применения различных типов нефтесборных устройств.

Созданные матрицы были конструктивно реализованы в составе системы моделирования и анализа аварий, связанных с загрязнением окружающей среды *Piscis*, производства компании «ТРАНЗАС».

Таблица 1

Матрица для определения угла постановки бонов

№	Обозначение зоны	Скорость течения, м/с	Угол постановки бонов, град	Длина дополнительных бонов, %
1		0,4	0	0
2		0,5	40	33
3		0,6	55	67
4		0,8	60	100
5		1,0	70	167

Таблица 2

Матрица выбора передвижных скиммеров

Скорость течения, м/с, цвет		Тип скиммера					
		Подвижный пороговый	Тросовый	Ленточный с олеофильной подъемной лентой	Щеточный	Ленточный с погруженной лентой	Ленточный со скребками
0–0,5							
0,5–1,0							
Условные обозначения:			не подходит («плохо»);				
			подходит («удовлетворительно»)				
			подходит («хорошо»)				

Выводы

1. В результате выполненных исследований обоснована необходимость применения решения трехмерных уравнений Навье–Стокса численным методом для расчета гидродинамических условий при ликвидации РН.

2. Приведен пример решения задачи оценки гидродинамических условий (скорости течения и интенсивности турбулентности) для участка аварийности транспортных судов на реке Волге.

3. Разработан порядок определения границ зоны моделирования поверхностных течений на основе реальной съемки русла реки (формирование требований к объему изысканий).

4. Впервые разработан и доведен до практического применения (конструктивно реализован в составе системы компьютерного моделирования и анализа аварий, связанных с загрязнением окружающей среды) комплекс гидрологически ориентированных матриц ЛРН, которые обеспечивают выбор эффективных средств борьбы и способа их установки на основе результатов численного моделирования поля течений и береговой черты.

Ключевым свойством предлагаемого подхода является его универсальность или независимость от применяемой системы имитационного моделирования разливов нефти.

Список литературы

1. Наумов В. С. Оценка ущерба при разливах нефти на объектах транспортного комплекса / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2010. — № 1 (5).

2. Наумов В. С. Проблема защиты экологически чувствительных территорий при разливах нефти на внутренних водных путях / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин, О. С. Нестерова // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19).

3. Пластинин А. Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность / А. Е. Пластинин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2 (18).

4. Руководство по ликвидации разливов нефти на морях, озерах и реках / под ред. Г. Овчинникова. — М.; СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2002. — Вып. 22. — 344 с.

5. Мерициди И. А. Техника и технологии локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов: справ. / И. А. Мерициди, В. Н. Ивановский, А. Н. Прохоров [и др.]; под ред. И. А. Мерициди. — СПб.: НПО «Профессионал», 2008. — 824 с.