

## РЕЦЕНЗИЯ № 2

на статью «**SPILLMOD - A CFD MODEL FOR INFORMATION SUPPORT OF MARINE OIL SPILL RESPONSE**»

авторского коллектива: S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, V. V. Solbakov

№	Вопросы и Критерии рецензирования	Да	Нет	Примечание
1.	Соответствует ли статья тематике журнала (если нет, остальное не заполняется)?	X		
2	Соответствует ли статья правилам оформления?	X		
3.	Замечания рецензента (если есть)?	X		
4.	Содержит ли статья новые результаты?		X	Статья-обзор ранее опубликованных работ
5.	Соответствует название содержанию материалов?	X		
6.	Имеется ли логичность и последовательность изложения материала?	X		
7.	Проведен ли анализ по заявленной проблематике?	X		
8.	Имеется ли статистическая обработка результатов (эксперимент)?		X	
9	Ясно ли сделаны математические выкладки?	X		Ясны, но есть замечания
10.	Ясно ли изложена методика исследования?		X	Не совсем
11.	Ясно ли изложены результаты работы?	X		
12.	Научный стиль изложения, терминология	X		
13.	Являются ли выводы достаточно обоснованными?		X	См. Замечания
14.	Имеется ли в статье необходимое сравнение с имеющимися результатами?		X	См. Замечания

15.	Сделаны ли в статье необходимые ссылки на источники? (если нет, приведите отдельно список	X		
16.	Удовлетворительно ли качество таблиц и иллюстраций?	X		Не совсем
17.	Удовлетворительно ли качество аннотации/Abstract/Keywords?	X		Заключение надо изменить
18.	Нуждается ли язык статьи в редактировании?	X		нуждается
19.	Может ли статья быть опубликована в существующем виде (возможно с некоторыми редакционными	X		
20.	Следует ли вернуть статью авторам для доработки? (если да, необходимо приложить конкретные замечания)		X	
21.	Следует ли отклонить статью? (если да, необходимо приложить конкретные замечания)		X	
22.	Следует ли направить статью в другое издание? Если да, то в какое?		X	
23.	Следует ли направить статью другому рецензенту? Если да, можете ли Вы рекомендовать рецензента?		X	
24.	Замечания рецензента (если есть) Есть			

Замечания к статье:

**Содержит ли статья новые результаты?** Отчасти, в статье приведен обзор опубликованных работ.

**Ясно ли сделаны математические выкладки?** Ясны, кроме того, что в принятом приближении мелкой воды вводятся сдвиги скорости и производные, включая число Ричардсона, коэффициент вертикальной диффузии, ф-ла Манка-Андерсона, что, в случае их использования, будут нарушать одно из условий приближения мелкой воды.

**Ясно ли изложена методика исследования?** Не совсем. См. ниже, при обсуждении Этапов.

**Являются ли выводы достаточно обоснованными?** Отчасти. В работе не приводятся примеры, обосновывающие элементы баланса массы нефти, которые необходимы для проверки модели и сравнения ее с другими моделями. Детально рассматривается только процесс испарения. Многие важные элементы баланса не рассматриваются.

**Имеется ли в статье необходимое сравнение с имеющимися результатами?** В главе 6 приведены примеры практически без обсуждения физических проблем, которые представлены. Не приведены, например, сопутствующие экспериментам поля скорости, по которым однозначно можно понять, как происходило распространение пятна. Например, на рис. 6 показаны пятна нефти в Персидском заливе: модельное и спутниковое. Поле скорости в северной части залива довольно сложное, с существенным влиянием приливов и ветра. Из рисунков трудно, не зная скорости, определить направления их развития.

Такие же неясности и для рис. 7 и 12.

Вопросы по модели: этапы I-II-III:

**1. Этап I** «all the necessary characteristics of the medium are known in the Eulerian representation».

Откуда поступает компоненты **u**? Как работает модель, в режиме off-line? Компоненты **u** поступают из модели циркуляции? Какой? Если данные поступают из сторонней модели, то как можно обеспечить оперативность в случае разлива?

## **2. Переход от I к II, от пленки к частицам:**

Как происходит назначение свойств (и каких) в частицах при переходе от пленки к частицам?

Почему на этом этапе в ур 4.2b и 4.3b не используется горизонтальная диффузия частиц.

Аналогично ур. (3.3). Для частиц это более оправдано, чем для «монокристаллического» пятна на первом этапе. Как параметры многокомпонентной нефти на этом шаге из слика переходят в каждую их частиц.

## **3. Этап III:**

Как на этом этапе опять «склеивается» слик из частиц? Какие временные шаги при этом? Вообще, когда представляется численная модель, то надо дать информацию о временных и пространственных шагах. Например, для случая на рис. 6.

## **4. Испарение.** На каком шаге включается этот процесс?

Как на этих шагах работает дисперсия? – Ур. (3.7) – (3.11) – если одно из требований «мелкой воды» в том, чтобы горизонтальная скорость была однородна по вертикали, что при наличии ветра и стратификации, конечно, не выполняется.

Не сказано, как в случае аварии оперативные данные будут поступать для оперативного слежения за пятном? Не описано, как взаимодействует SPILLMOD с моделью циркуляции.

**5. Oil mass balance.** Очень важная характеристика для всех oil spill моделей, которая, обычно, демонстрируется, чтобы показать правильность расчетов. В данной работе этот вопрос не обсуждается. Ряд важных процессов в работе не учитываются, хотя начало их действия и продолжительность сравнима с диспергированием и испарением.

## **6. Англ. язык:**

В работе встречается много неточностей и необходим “polishing up by a native English speaking person”, чтобы заменить «неправильные» слова и словосочетания на корректные – вот некоторые: (многие не стал отмечать)

### *1. flux и flow*

- mass flow, momentum flow надо заменить на mass flux и momentum flux
- friction stress -> bottom (surface) stress или frictional shear stress.

### *2 Примеры подписей к рисункам:*

в англ. (a) и (b) ставятся в начале:

- Figure 1 – *Schematization* (лучше Sketch(es) или Schematic) of oil spill spreading: (a) in open water and (b) at the contact boundary

Кстати, что значит free и contact boundaries? известны границы – open, closed, free surface, rigid lid и условия на них.

- Figure 2 – *Example of calculating the configuration of an oil spill in a port:*

*1 hour after the start of discharge (a) and after 2 hours (b)*

Пример подписи: Two phases (or snapshots) of an oil spill evolving in a port (a) 1 hour (b) 2 hours after the (spill) release.

В тексте остались русские слова age 1 *Авторы Аффiliationи.*

Ссылка 1 после ур (3.20) осталась, написанной по-русски.

## **7. Conclusions**

Заключение составлено из общих фраз, надо выделить, что конкретно авторам получено по физике явления и в чем превосходство SPILLMOD по сравнению с тем многообразием «нефтяных» моделей, которые имеются в настоящее время – см. недавний обзор Zodiatis et al., 2021 <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>, который их систематизирует.

В работе авторы упоминают только модели GNOME и ADIOS2.

**Вывод:**

В предложенной работе описана модель, учитывающая только процесс испарения. Все остальные составляющие в баланс масс нефти не рассматриваются. Правда, сделана попытка вовлечь процесс Дисперсии, но это приводит к введению сдвига скорости, (т.е. неоднородности скорости) и зависящих от него параметров, напр., числа Ричардсона  $f(dU/dz)$ , что нарушает принятое ранее условие приближения «мелкой воды». Это не стыкуется с постановкой задачи, хотя сам подход к дисперсии интересен и при случае полной системы уравнений может значительно улучшить модель. Сейчас же модель может работать на «коротких» временах после выброса, когда испарение легких фракций является основным фактором деградации нефтяного пятна. Для работы с большими разливами необходимы все факторы, влияющие на процесс деградации.

Таким образом, для быстрого реагирования при разливе небольших пятен нефти предложенная модель вполне подходит и при ответе на поставленные вопросы, рекомендую статью к публикации.

<b>Рекомендация к опубликованию (подчеркнуть):</b>		
Публиковать безусловно	<u>Публиковать</u> <u>после доработки/устранения</u> <u>замечаний</u>	Отклонить (обосновать!)

**Подпись: Рецензент №и2. 20.06.2022.**

**От редакции:** рецензия была направлена редакцией авторскому коллективу.

**Ответ рецензенту №и2 на Рецензию от 22.06.2022 на статью авторского коллектива: S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, V. V. Solbakov «SPILLMOD - A CFD MODEL FOR INFORMATION SUPPORT OF MARINE OIL SPILL RESPONSE».**

Авторы благодарны рецензенту № 2 за прочтение статьи и высказанные замечание, однако, безусловными авторам представляются замечания по несколько общему содержанию заключения статьи и недостаточным знанием оформления текста на английском языке.

Мы просим рецензента посмотреть ответы на сформулированные в рецензии вопросы и сообщить насколько правильно мы поняли замечания, насколько понятны наши ответы.

В статье с очевидностью есть несколько частей, каждая из которых могла бы быть темой отдельной работы и, на самом деле, в большинстве случаев так и есть. То же относится и к примерам, приведенным в статье. Отдельные части статьи уже опубликованы в виде авторских решений. Представленные примеры были получены в научно-практических исследованиях, проводимых авторами по заказам нефтяных компаний. Компании редко дают разрешения на публикацию материалов, имеющих отношение к их профессиональной деятельности. В представленной статье многие вопросы описаны конспективно, рассчитывая, что заинтересованный читатель обратится к первоисточникам, ссылки на которые в тексте есть. С точки зрения авторов, представленная статья демонстрирует последовательное решения задачи от анализа специфики морских разливов нефти (глубоководные выбросы и поведение нефти в ледовых условиях не рассматриваем) до предложения новых расчетных методов для оценки конфигурации и количества нефти на поверхности моря. Подчеркнем, что

представленная модель разработана не для экологических задач, а для применения до, во время и после разлива нефти для анализа возможности применения имеющихся сил и средств реагирования на разливы.

Авторы внесли редакционные исправления, предложенные рецензентами № 1 и № 2. Зеленый маркер – изменения по замечаниям рецензента 1, желтый – рецензент 2.

**Ответы на замечания к статье:**

1	<p><b>4. Содержит ли статья новые результаты?</b> Отчасти, в статье приведен обзор опубликованных работ.</p> <p><b>Ответ:</b> действительно, авторы ранее опубликовали работы по новой модели диспергирования нефти [Зацева С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В. Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов // Океанология. 2018b. Т. 58. № 6. С. 843–853. DOI: 10.1134/S003015741806016], новой модели испарения нефти [Зацева С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В. Исследование чувствительности псевдокомпонентной модели испарения нефти на поверхности моря к вариации параметров // Процессы в геосредах, 2020, Вып. 2., Стр. 662–674], методике оценки области обнаружения нефтяного пятна [Солбаков В.В., Зацева С.Н., Ивченко А.А., Становой В.В. О методике расчета области вероятного обнаружения нефтяного загрязнения на поверхности моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 5–13].</p> <p>Однако представленная статья описывает математическую модель распространения нефти по поверхности моря в достаточно полной постановке (впервые) для информационной поддержки операций по реагированию на морской разлив нефти. В этой связи в модели присутствуют только необходимые компоненты. В статье указано (впервые), что морские разливы нефти существенным образом отличаются от исследований процесса растекания в лабораторных условиях. Авторы обращают внимание (впервые), что ни одна из 18 моделей нефтяного разлива, ссылки на которые есть, например, в обзоре [Keramia et al., 2021] не дает оценку площади нефтяного разлива в присутствии контактных границ. Представленная модель SPILLMOD предоставляет такую возможность. Математическая постановка задачи оригинальна, так как решение задачи – определение поля толщины и скорости движения нефти – ищется в области, которая сама является искомой величиной. Граничные условия на границе области могут меняться, так что свободная граница может переходить в контактную и наоборот. Решение ищется в области произвольной геометрии, так что аналитические оценки площади и конфигурации принципиально невозможны. По этой причине в статье дается описание численного метода решения задачи.</p> <p>По мнению авторов, представленная статья не является обзором, но демонстрирует полноту рассмотрения задачи о распространении морских разливов нефти с учетом главных факторов и механизмов, контролирующих поведение разлива.</p>
2	<p><b>9. Ясно ли сделаны математические выкладки?</b> Ясны, кроме того, что в принятом приближении мелкой воды вводятся сдвиги скорости и производные, включая число Ричардсона, коэффициент вертикальной диффузии, ф-ла Манка-Андерсона, которые, в случае их использования, будут нарушать одно из условий приближения мелкой воды.</p> <p><b>Ответ:</b> Замечание требует уточнения. Система уравнений мелкой воды в расширенной постановке дается уравнениями (3.1) – (3.5). Расширенная постановка связана с дополнительным членом в уравнениях, описывающим вязкое трение в слое нефти. Тензор вязких напряжений задается соотношением (3.3), в котором присутствуют производные скорости движения нефти по горизонтальным координатам. В рассматриваемой постановке скорость движения в слое нефти не зависит от вертикальной координаты. В уравнении (3.1) и соотношении (3.3) градиенты скорости нефти присутствуют только по горизонтальным координатам.</p>

	<p>Соотношение Манка-Андерсона для вертикального коэффициента диффузии в верхнем слое океана с коррекцией на устойчивость (функция от числа Ричардсона в верхнем слое моря) используется при описании потока капель нефти в водную толщу. Согласно с тем, что, к сожалению, в соотношении (3.11) использованы обозначения для скорости течения без уточнения, что они относятся к течению не в нефти, а верхнем слое океана.</p> $K(z) = \kappa v_w^* z \cdot \text{Pr}^{-1} \cdot e^{-k_d z} f(Ri),$ <p>where <math>\kappa</math> is the Karman constant, <math>v_w^*</math> is the dynamic velocity in water, <math>z</math> is the depth, <math>\text{Pr}</math> is the turbulent Prandtl number, <math>k_d</math> is the attenuation coefficient of turbulent stresses with depth, <math>f(Ri) = (1 + \alpha Ri^\gamma)^{-\beta}</math>, <math>Ri</math> is the Richardson number depending on the density stratification in the sea upper layer, <math>Ri = N^2 (\frac{\partial u_w}{\partial z})^{-2}</math>, <math>N^2 = \frac{g}{\rho_w} \frac{\partial \rho}{\partial z}</math>, <math>N</math> is the Brunt-Väisälä frequency.</p>
3	<p><b>10. Ясно ли изложена методика исследования? Не совсем. См. ниже, при обсуждении Этапов.</b></p> <p><b>Ответ:</b> Представленная статья не относится к традиционным исследованиям физических процессов. С точки зрения авторов, модель строго следует логике построения моделей, каждая из которых необходима для решения конкретных практических задач. В данном случае задача для моделирования – определение конфигурации, изменения физических свойств нефти, оценка количества нефти на поверхности, т.е. то, что необходимо знать при выборе стратегии и ликвидации разлива.</p>
4	<p><b>13. Являются ли выводы достаточно обоснованными? Отчасти:</b></p> <p><i>В работе не приводятся примеры, обосновывающие элементы баланса массы нефти, которые необходимы для проверки модели и сравнения ее с другими моделями. Детально рассматривается только процесс испарения. Многие важные элементы баланса не рассматриваются.</i></p> <p><b>Ответ:</b> В статье с подробностью, ограниченной объемом изложения, четко сформулирована математическая задача, которая решается во всех случаях, примеры которых приведены в разделе 6. Уравнение баланса массы (3.2) точно выполняется и в модели описывается изменением массы частиц (соотношение (4.6)). Обращаем внимание рецензента, что представленный в работе метод решения задачи, который является развитием метода частиц в ячейках, впервые предложенном Харлоу [Harlow, 1964], не имеет ничего общего с методом случайных блужданий, при использовании которого часто говорят о моделировании «методом частиц». Модель SPILLMOD это решение уравнений (3.1) – (3.2) с граничными условиями (3.4) (3.5) и в этом уравнении нет случайных блужданий.</p> <p>Баланс массы в модели не может не выполняться, так как уравнение баланса массы (3.2) и соотношение (4.6) строго делят массу пролитой нефти на оставшуюся на поверхности, испарившуюся и диспергированную в водную толщу. Дальнейшая судьба нефти, попавшей в атмосферу и в водную толщу, в статье не рассматривается.</p> <p>Неясно, какие важные элементы баланса массы нефти в разливе имеет в виду автор. Если говорить о процессе растворения нефти, то этот процесс в сотню раз менее интенсивный, чем испарения, хотя растворяются и испаряются одни и те же компоненты нефти.</p>
5	<p><b>14. Имеется ли в статье необходимое сравнение с имеющимися результатами?</b></p> <p><i>В главе 6 приведены примеры практически без обсуждения физических проблем, которые представлены. Не приведены, например, сопутствующие экспериментам поля скорости, по которым однозначно можно понять, как происходило распространение пятна. Например, на рис. 6 показаны пятна нефти в Персидском заливе: модельное и спутниковое. Поле скорости в северной части залива довольно сложное, с существенным влиянием приливов и ветра. Из рисунков трудно, не зная скорости, определить направления их развития.</i></p> <p><i>Такие же неясности и для рис. 7 и 12.</i></p>

	<p><b>Ответ:</b> Движение пятна нефти по линиям тока поверхностных течений действительно в статье не показано, так как не приводятся сведения о моделях океанской циркуляции. Кроме того, на рисунке можно показать только «снимок» мгновенного поля скоростей, однако распространение пятна происходит в постоянно меняющемся поле скорости, и эти поля невозможно представить в статье. Авторы обратили внимание во введении, что распространенным «штампом» представления модели распространения нефти является включение в её описание комплекса региональных моделей расчета приводного ветра, океанских течений и нефтяного разлива. По отношению к конкретным кейсам это совершенно верно, однако в данной статье авторы хотели продемонстрировать взаимосвязи между основным процессами, контролирующими разлив нефти в первые часы–сутки–неделю, независимо от географической привязки инцидента. И испарение, и диспергирование существенно определяются площадью и толщиной слоя нефти на поверхности. Модель растекания, описанная в разделе 3, предоставляет необходимую информацию для расчета потоков на испарение и диспергирование. Соотношения (3.23)–(3.26) позволяют рассчитать изменение свойств разлившейся субстанции (плотность и вязкость) за счет испарения легких фракций и образования эмульсии типа вода в нефти.</p> <p>Причина представления Рисунка 7 в статье заключается в желании показать, что вычислительный метод, представленный в статье, позволяет рассчитать <i>поле толщины</i> нефтяного слика в районах с сильной приливной динамикой (платформа Моликпак на Сахалине).</p> <p>Пример расчета, показанный на Рисунке 12, имеет целью показать, что вследствие неизбежных погрешностей при расчете приводного ветра и морских течений, положение нефтяного слика/пятна может быть определено только в терминах теории вероятности.</p>
6	<p><b>Вопросы по модели: этапы I-II-III:</b></p> <p><b>1. Этап I</b> «<i>all the necessary characteristics of the medium are known in the Eulerian representation</i>».</p> <p><b>Вопрос:</b> Откуда поступает компоненты <i>u</i>? Как работает модель, в режиме <i>off-line</i>? Компоненты <i>u</i> поступают из модели циркуляции? Какой? Если данные поступают из сторонней модели, то как можно обеспечить оперативность в случае разлива?</p> <p><b>Ответ:</b> Оперативное использование модели при инцидентах, связанных с разливами нефти, предполагает, что прогностические поля течений и ветра автоматически поступают на рабочее место прогнозиста, где установлено программное обеспечение SPILLMOD. Прогнозы ветра и течений для акваторий интереса выпускаются в режиме 24/7, а для запуска модели разлива необходима информация о типе нефтепродукта, количестве пролитой нефти, продолжительности истечения, координатах сброса, дате и времени аварии. Эта технология ранее была описана в работе авторов [Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В. Опыт создания оперативных моделей расчета распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом море // Арктика: экология и экономика. 2014а. № 4 (16). С. 68 – 76].</p> <p>В статье описана именно модель разлива нефти, которая может работать с разными моделями морской циркуляции. Для этого выходная продукция моделей циркуляции должна быть записана в согласованном формате. Модель нефтяного разлива SPILLMOD использовалась с различными моделями течений – на Баренцевом море использована модель Гидрометцентра России (авт. Попов С.К.), на Охотском море – модель Гидрометцентра России и модель INMOM (авт. Дианский с коллегами). Авторы статьи всегда используют результаты расчетов течений и ветра из сторонних моделей, и их описание не входило в задачу публикации.</p> <p>Расчет модели проводится шагами по времени, определяемыми устойчивостью численной схемы для решения уравнений (3.1) – (3.2). Во время расчета поля</p>

	<p>морских течений и ветра интерполируются по пространству и по времени в точки, соответствующие узлам построенной условной эйлеровой сетки. Положение этих узлов меняется, так как сетка движется вместе с пятном нефти. Для повышения быстродействия в районах, где поля течений можно считать слабо меняющимися на пространственных масштабах пятна нефти, для расчета временного шага используется скорость движения пятна нефти относительно воды. В начальные моменты времени, когда размеры пятна составляют десятки метров, временной шаг может уменьшаться до долей секунды. На поздних стадиях расчета, особенно в условиях открытого моря, временной шаг гидродинамической модели может увеличиваться до нескольких минут.</p>
7	<p><b>2. Переход от I к II, от пленки к частицам:</b>  <b>Вопрос:</b> Как происходит назначение свойств (и каких) в частицах при переходе от пленки к частицам?  <b>Ответ:</b> Частицы присутствуют только в численном методе. Свойства/атрибуты частиц описаны в строках 534- 539.  The modeling object (oil spill) is represented as an ensemble of Lagrangian particles, each of which has a set of parameters, in this case, such as spatial coordinates <math>\{x_i, y_i\}</math>, velocity <math>\{u_i, v_i\}</math> and mass <math>\{m_i\}</math>. The initial state is set if all the parameters of the particles are known: <math>\{x_i, y_i\}_{t=0}, \{u_i, v_i\}_{t=0}, \{m_i\}_{t=0} \in \Omega_0</math>, where <math>\Omega_0</math> – the initial configuration of the oil spill. The number of particles <math>N_p</math> can be variable, sufficient to determine the configuration of the region <math>\Omega_0</math>, and subsequently <math>\Omega(t)</math>.  Частицы использованы только для решения математической задачи (3.1) – (3.5) и расчета толщины пленочного загрязнения на поверхности. Переход из пленки в капли не предполагает организацию специального ансамбля частиц. В разделе 3.3 представлен алгоритм расчета потока нефти из пленки в дисперсную фазу. Дальнейшая эволюция дисперсной фазы в статье не рассматривается, хотя такая задача может быть решена как адвективно-диффузионная задача для полидисперсного распределения капель нефти по размерам с пространственно-распределенным источником, располагающемся на поверхности и движущемся со скоростью поверхностного течения, рассчитанного в модели течений с учетом всех необходимых факторов.</p>
8	<p><b>Вопрос:</b> Почему на этом этапе в ур 4.2b и 4.3b не используется горизонтальная диффузия частиц?  <b>Ответ:</b> В рассматриваемой задаче о растекании нефти по поверхности моря нет горизонтальной диффузии. Частицы в численном методе движутся в соответствии со скоростями, рассчитанными на этапе 1 по уравнению (4.2a). Традиционно диффузия рассматривается как процесс рассеяния отдельных нефтяных пятен по поверхности моря. Это процесс начинается после того, как нефтяной слик будет разрушен на отдельные фрагменты. Диффузионная задача формулируется и решается для определения концентрации диффузанта, либо объемной, либо поверхностной. Постановка задачи, представленная уравнениями (3.1) – (3.5), предполагает определение толщины слоя нефти на поверхности моря.</p>
9	<p><b>Вопрос:</b> Аналогично ур. (3.3). Для частиц это более оправдано, чем для «монолитного» пятна на первом этапе??  <b>Ответ:</b> Соотношение (3.3) определяет компоненты тензора напряжений внутри нефтяного пятна. Компоненты тензора зависят от производных скорости нефти по горизонтальным координатам. В соотношении (3.3) использован коэффициент молекулярной вязкости нефти</p>
10	<p><b>Вопрос:</b> Как параметры многокомпонентной нефти на этом шаге из слика переходят в каждую из частиц?  <b>Ответ:</b> Каждая частица, ансамбль которых представляет нефтяной слик на</p>



лагранжевом этапе вычислительного метода, «несет» на себе меняющийся фракционный состав. Изменение массы частицы происходит в соответствии с соотношением (4.6), а плотность и вязкость нефтяного остатка на поверхности для расчета диспергирования определяется как среднее по ансамблю частиц, попавших в ячейку условной эйлеровой сетки.

11

**3. Этап III:**

**Вопрос:** Как на этом этапе опять «склеивается» слик из частиц? Какие временные шаги при этом?

**Ответ:** Как склеивается слик описано в строках с 540 по 567, а именно:

A rectangular Eulerian grid is “stretched” over a Lagrangian ensemble of particles, so that all particles are contained inside the grid region, as shown in Figure 5.

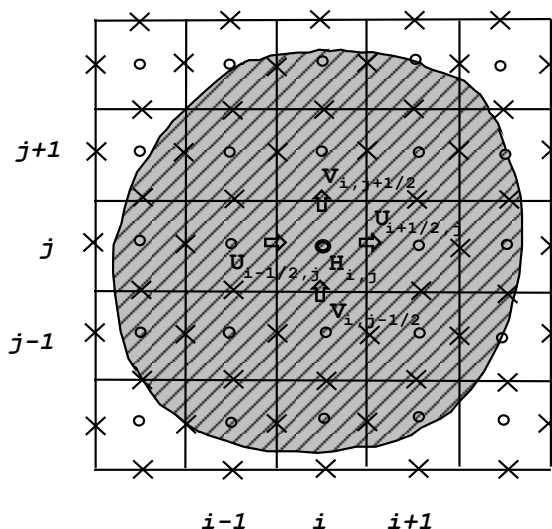


Figure 1 – Schematized view of the Eulerian grid for calculating oil spreading (the shaded area is occupied by the simulated medium)

After that, the velocity of movement in the oil layer  $\mathbf{u}(x, y, t)$  and the thickness of the oil  $h(x, y, t)$  are determined in the Eulerian representation. The method uses a grid "C" according to the Arakawa classification, or a "checkerboard" grid, in which the values of the thickness of the oil layer are assigned to the centers of the cells, and the velocities are calculated on its faces. The components of the velocity along the X axis are determined in the centers of the left and right borders of the cell, as  $u_{i-1/2,j}$  and  $u_{i+1/2,j}$ , the components of the velocity  $v$  in the middle of the upper and lower sides, as  $v_{i,j+1/2}$  and  $v_{i,j-1/2}$ . The separation of grid functions in the coordinate space makes it possible to interpret each cell as an element of the volume of the medium, which is characterized by the pressure (thickness) calculated in its center. Knowing the normal component of the velocity at the cell boundaries allows one to directly calculate the impulse and mass flow through this boundary. The computational grid used in this technology is not absolutely Eulerian, since it is reconstructed at each time step depending on the configuration of particles and differs from the traditional Eulerian representation of fixed points in space. The thickness  $h_{i,j}$  is calculated using the sum of the masses of individual particles related to the area of the cell occupied by the particles:

$$h_{i,j} = \frac{1}{\rho_o} \frac{1}{\gamma \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{ij}} m_k,$$

where  $\gamma$  – the part of the cell area occupied by particles,  $m_k$  – the mass of the  $k$ -th particle,  $N_{ij}$  – the number of particles in  $(i, j)$  cell,  $\Delta x, \Delta y$  – the size of the cell in two

	horizontal coordinates, respectively. As a method of the velocity reduction from particles to the grid, SPILLMOD uses linear regression, which has a higher order of accuracy in contrast to the "nearest node" method used in the original method PIC (Harlow, 1964).
12	<p><b>Вопрос:</b> Вообще, когда представляется численная модель, то надо дать информацию о временных и пространственных шагах. Например, для случая на рис. 6</p> <p><b>Ответ:</b> для решения системы уравнений мелкой воды, относящейся к уравнениям гиперболического типа, традиционным является использования критерия Куранта для устойчивого расчета. Шаг сетки при этом определяется размерами <b>нефтяного</b> пятна и задаваемым числом ячеек условной эйлеровой сетки. В основных версиях модели SPILLMOD эйлерова сетка состоит из примерно 2000 ячеек, что при симметричном пятне приводит к размерности примерно 45*45 ячеек или, в случае вытянутого пятна может быть и 5*400, так как сетка адаптивная и строится на каждом шаге по сложившейся конфигурации лагранжевых частиц. По осям <math>x</math> и <math>y</math> размеры ячейки сетки одинаковые. Что касается расчетов распространения разлива в Персидском заливе, то при размерах нефтяного пятна в несколько десятков километров, шаг по пространству составлял, по-видимому, от сотен метров до нескольких километров, так как в море вылилось огромное количество (порядка миллиона тонн) нефти.</p>
13	<p>606 At this step, the calculation of mass flows due to evaporation and dispersion processes is</p> <p>607 performed in accordance with the equations (3.8)–(3.27) and the calculation of new values of the</p> <p>608 mass of the <math>k</math>-th particle in accordance with:</p> <p>609 <math display="block">m_k(t + \Delta t) = m_k(t) - \Delta t(Q_e + Q_d)S_k, \quad (4.6)</math></p> <p>610 where <math>S_k = \gamma \Delta x \Delta y / N_{i,j}</math>.</p>
14	<p><b>Вопрос:</b> Испарение: на каком шаге включается этот процесс?</p> <p><b>Ответ:</b> В строке 606 отмечено, что при известной толщине слика в ячейке эйлеровой сетки расчет потоков массы нефти с поверхности за счет испарения и диспергирования происходит на каждом расчетном шаге.</p> <p>Иногда, шаги на эйлеровом шаге расчетов и на лагранжевом могут быть разными. Для быстроиспаряющихся нефтепродуктов временной шаг на эйлеровом этапе, как правило, меньше чем на лагранжевом. При взаимодействии нефтяного слика со сложной конфигурацией берега, лагранжев шаг переноса частиц может дробиться на более мелкие, в сумме соответствующие эйлеровому шагу.</p>
15	<p><b>Вопрос:</b> Как на этих шагах работает дисперсия? Ур. (3.7) – (3.11) - если одно из требований «мелкой воды» требует, чтобы горизонтальная скорость была однородна по вертикали, что при наличии ветра и стратификации, конечно, не выполняется</p> <p><b>Ответ:</b> Соотношения (3.7) – (3.11) не имеют отношения к модели мелкой воды. С помощью этих соотношений записан алгоритм расчета потока массы нефти из пленки в воду. Дальнейшая судьба диспергированной нефти не рассматривается.</p> <p>Поток диспергированной нефти рассчитывается по соотношению (3.7). Для определения функции распределения капель нефти по размерам определяется медиана распределения (3.8). Соотношение (3.9) использовано для оценки части проникшей под воду нефти, не возвращающейся к поверхности между актами обрушения волн. Выражение (3.10) показывает роль турбулентной диффузия при расчете количества нефти, проникающей в воду. А соотношение (3.11) демонстрирует, что не только скорость ветра через динамическую скорость участвует в формирования турбулентного обмена массой и импульсом в верхнем слое моря, но еще и важна устойчивость стратификации в верхнем слое моря, выраженная через число Ричардсона.</p> <p>Авторы считают, что включение фактора устойчивости в расчет диспергирования нефти из пленки в капли важное уточнение в модели процесса диспергирования.</p>

16	<p><b>Вопрос:</b> Не сказано, как в случае аварии оперативные данные будут поступать для оперативного слежения за пятном? Не описано как взаимодействует SPILLMOD с моделью циркуляции.</p> <p><b>Ответ:</b> Оперативное использование модели при инцидентах, связанных с разливами нефти, предполагает, что прогностические поля течений и ветра автоматически поступают на рабочее место прогнозиста, где установлено программное обеспечение SPILLMOD. Прогнозы ветра и течений для акваторий интереса выпускаются в режиме 24/7, а для запуска модели разлива необходима информация о типе нефтепродукта, количестве пролитой нефти, продолжительности истечения, координатах сброса, дате и времени аварии. Эта технология ранее была реализована в Гидрометцентре РФ и описана в работе авторов [Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В. Опыт создания оперативных моделей расчета распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом море // Арктика: экология и экономика. 2014а. – № 4 (16). С. 68 – 76].</p>
17	<p><b>Вопрос:</b> Oil mass balance. Очень важная характеристика для всех oil spill моделей, которая, обычно, демонстрируется, чтобы показать правильность расчетов. В данной работе этот вопрос не обсуждается. Ряд важных процессов в работе не учитываются, хотя начало их действия и продолжительность сравнима с диспергированием и испарением.</p> <p><b>Ответ:</b> Баланс массы нефти или нефтепродукта представляет интерес только по отношению к конкретному кейсу/инциденту. Авторы поставили перед собой задачу представить физически достоверную модель основных процессов, важных при информационной поддержке реагирования на разливы нефти.</p>
18	<p><b>Англ. язык:</b>  В работе встречается много неточностей и необходим “polishing up by a native English speaking person”, чтобы заменить «неправильные» слова и словосочетания на корректные --- вот некоторые: (многие не стал отмечать)</p> <p>1. flux и flow</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mass flow, momentum flow надо заменить на mass flux и momentum flux</li> <li>- friction stress -&gt; bottom (surface) stress и л и frictional shear stress.</li> </ul> <p><b>Замечание принято.</b></p>
19	<p>2 Примеры подписей к рисункам: в англ. (a) и (б) ставятся в начале</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Figure 1 – Schematization (лучше Sketch(es) или Schematic) of oil spill spreading: (a) in open water and (b) at the contact boundary</li> </ul> <p><b>Замечание принято.</b></p>
20	<p><b>Вопрос:</b> Кстати, что значат free и contact boundaries? известны границы - open, closed, free surface, rigid lid и условия на них.</p> <p><b>Ответ:</b> Нетривиальность постановки задачи и ее решения заключается в том, что решение задачи (3.2) – (3.5) ищется в области, которая сама является искомой величиной. Граница области движется в соответствии со скоростями частиц, ее составляющих. Этот факт отражен в кинематическом условии на свободной/подвижной границе. Через границу нет потока массы, но ее конфигурация может меняться.</p> <p>В нашем случае читаем у Седова Л.И. «Механика сплошной среды», Т1, 1970.</p>

**Условия на свободной границе**

Во многих задачах граница  $S$  или некоторая ее часть  $S_2$  области непрерывного движения сплошной среды заранее неизвестна и должна быть определена в результате решения задачи. На неизвестной границе  $S_2$  обычно задаются внешние

---

### § 1. Общие основы постановки конкретных задач

341

На контактной границе задается условие непротекания или равенства нулю нормальной к участку границы скорости движения нефти.

21

- *Figure 2 – Example of calculating the configuration of an oil spill in a port: 1 hour after the start of discharge (a) and after 2 hours (b)*

*Пример подписи: Two phases (or snapshots) of an oil spill evolving in a port (a) 1 hour (b) 2 hours after the (spill) release*

**Замечание приятно.**

В тексте остались русские слова page 1 Авторы Аффiliationи

- Ссылка 1 после ур (3.20) осталась, написанной по-русски

- **Исправлено.**

22

**7. Conclusions**

**Замечание.** Заключение составлено из общих фраз, надо выделить, что конкретно авторам получено по физике явления и в чем превосходство SPILLMOD по сравнению с тем многообразием «нефтяных» моделей, которые имеются в настоящее время - см. недавний обзор Zodiatis et al., 2021 <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>, который их систематизирует.

В работе авторы упоминают только модели GNOME и ADIOS2.

**Ответ:** С точки зрения авторов, «систематизация» в обзоре [Keramia et al., 2021] состоит лишь в указании из каких «кирпичиков» сложена та или иная модель. Самих «кирпичиков» немного – растекание по Фэю, диспергирование по Дельвину и Свини, испарение по Маккею, растворение пропорционально растворимости компонентов через коэффициент массопередачи и т.д. Новых параметризаций процессов не представлено. И многообразия «нефтяных моделей» тоже нет. Уровень доверия к оценке многих характеристик невысокий. В задачу нашей статьи не входило сравнение той или иной модели со SPILLMOD. Представленная статья далеко не обзор со сравнением плюсов и минусов современных моделей.

В названии мы подчеркнули, что SPILLMOD одна из немногих моделей растекания гидродинамического типа, т.е. не использующая простые соотношения типа Фэя для расчета размеров и конфигурации пятна, а позволяющая рассчитывать поле толщины в нефтяном пятне с учетом взаимодействия с контактными границами путем решения системы уравнений типа мелкой воды. В некотором смысле похожий подход (в смысле модели растекания) был в работе [Бровченко И.А., Мадерич В.С. Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти // Прикладная гидромеханика. 2002. № 4(76). С. 23 – 31] и в работе [Deleersnijder, E., 1992. Revisiting Nihoul's model for oil slicks transport and spreading on the sea. Ecol. Modelling, 64: 71 – 75], однако и названные работы с одной стороны не заявляют возможность рассчитывать конфигурацию разлива с учетом контактных границ, не предлагают современных параметризаций процессов

выветривания, являются, по сути только частью модели разлива, которые, как мы неоднократно подчеркиваем, создаются для решения конкретных практических задач.

Американский подход к моделированию, в котором есть транспортная модель (GNOME) и модель выветривания (ADIOS), представляется авторам ярким примером некорректного моделирования инцидентов, связанных с проливом нефти в море. Кстати, коллеги из NOAA, с которыми у авторов была возможность обсуждать задачу поддержки реагирования на разливы нефти, не возражают против нашей оценки. Публикация нашей статьи (если состоится) имеет своей целью показать для западной аудитории российские достижения в области моделирования разливов нефти в море.

В заключении мы отметили, что модель SPILLMOD, основные черты которой представлены в статье, во-первых, позволяет рассчитывать область нефтяного загрязнения при сложной геометрии контактных границ (например, портовые территории). Во-вторых, модель SPILLMOD включает современные параметризации потоков нефти из слика за счет испарения и диспергирования. Примеры расчетов по модели приведены в разделе 6, который может рассматриваться как начало Заключения. В Заключение отмечено, что для использования модели авторы разработали эйлерово-лагранжев численный метод, позволяющий реализовать решение задачи в заявленной постановке. Авторы акцентируют внимание, что детальный расчет площади пятна на поверхности моря залог корректного расчета и испарения и диспергирования. Возможностью рассчитывать толщину нефтяного пятна и конфигурацию разлива с учетом вышеотмеченных факторов не может похвалиться ни одна из современных моделей разливов нефти. Авторы отмечают, что при расчете будущего положения нефтяного слика необходимо учитывать погрешности расчетов гидрометеорологических параметров (морских течений тоже) и дают алгоритм для оценки конфигурации области обнаружения разлива с заданной вероятностью.

The SPILLMOD model provides an opportunity (i) to calculate the configuration of an oil spill on the high seas and in port waters. The model complex includes (ii) modern parameterization of the processes of oil dispersion by wind waves and (iii) evaporation, taking into account restrictions on the transport of volatile components in a hydrocarbon mixture to the oil-air interface due to molecular diffusion. The model can be implemented using the Eulerian-Lagrangian technology developed by the authors to solve the problem of oil spreading on the sea surface within the framework of the shallow water theory, considering free and contact boundaries limiting the spreading. The emphasis on a more accurate calculation of the oil spill area gives an advantage over many models of oil distribution in the sea, since the amount of evaporated oil, the thickness of the oil slick and the intensity of oil dispersion directly depend on the calculation of the oil slick area. The final viscosity of oil on the sea surface depends on the amount of evaporated oil, which must be taken into account when choosing a method of combating a spill. It should be emphasized that in order to predict the behavior of marine oil and petroleum product spills, it is extremely important to determine spatially inhomogeneous current velocities in the upper layer of the ocean. The uniqueness of each of the oil spills that have already occurred and those that will occur in the future is determined not only by the volume and type of oil spilled, but also by regional hydrometeorological conditions.

23

**Вывод:**

*В предложенной работе описана модель, учитывающая только процесс испарения. Все остальные составляющие в баланс масс нефти не рассматриваются. Правда, сделана попытка вовлечь процесс Дисперсии, но это приводит к введению сдвига скорости, (т.е. неоднородности скорости) и зависящих от него параметров, напр., числа Ричардсона  $f(dU/dz)$ , что нарушает принятое ранее условие приближения «мелкой воды». Это не стыкуется с постановкой задачи, хотя сам подход к дисперсии интересен и в случае полной системы уравнений может значительно улучшить модель. Сейчас же модель может работать на «коротких» временах*

	<p><i>после выброса, когда испарение легких фракций является основным фактором деградации нефтяного пятна. Для работы с большими разливами необходимы все факторы, влияющие на процесс деградации.</i></p> <p><b>Ответ:</b> Выше авторы ответили рецензенту, что соотношения (3.7) – (3.11) не имеют отношения к модели мелкой воды, а нужны лишь для расчета потока из нефтяного пятна в водную толщу за счет диспергирования. По этой причине вывод рецензента представляется необоснованным.</p> <p>Именно большие объемы нефти лучше описываются моделью SPILLMOD, так как для них больше имеет место режим растекания и слой нефти на поверхности имеет существенную толщину. Если рецензент имеет в виду продолжительные разливы (тоже большие) нефти, то в таких случаях, возможно наиболее эффективным будет лагранжев подход, описанный в работе авторов [Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В. «Метод моделирования последствий сверхпродолжительных аварий на объектах нефтедобычи в Арктическом регионе», Проблемы Арктики и Антарктики, 2018, Том 64, № 4, стр. 428-443]/</p> <p>Точка зрения рецензента о том, что большие разливы требуют учета всех процессов деградации, справедлива в том отношении, что крупные разливы оказывают влияние на экологию морской среды в течение большого промежутка времени и для экологических приложений учет растворения и седиментации, и в некоторых случаях биodeградации необходим. Однако модель SPILLMOD не заявлена как модель для экологических приложений, а с точки зрения реагирования на разливы нефти важна площадь разлива и количество нефти на поверхности, что определяется процессами растекания, испарения и диспергирования.</p>
24	<p><i><b>Замечание.</b> Таким образом, для быстрого реагирования при разливе небольших пятен нефти предложенная модель вполне подходит и при ответе на поставленные вопросы, рекомендую статью к публикации.</i></p> <p><b>Ответ:</b> См. ответ на замечание выше.</p>

**С уважением, авторский коллектив. 27.06.2022.**

**От редакции:** ответ и доработанная версия статьи были направлены редакцией рецензенту.

**Подтверждение Рецензента № 2 на публикацию:**

Здравствуйте.

Ознакомился с ответами авторов на замечания. Считаю, ответы исчерпывающими и что доработанный вариант статьи может быть опубликован в журнале.

**Подпись. Рецензент № 2. 03.07.2022.**