

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА БРЫЗГОВОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ СУДОВ

ст. науч. сопр. В.И.ДЫМОВ, науч. сопр. Н.П.ЯКОВЛЕВА,
ст. науч. сопр. Т.А.ПАСЕЧНИК, науч. сопр. В.В.АЛЕКСЕЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: dytov@aari.nw.ru

Рассмотрены два численных метода расчета и прогноза брызгового обледенения судов: метод Оверлэнда, используемый в службе погоды США, и метод расчета брызгового обледенения с помощью комплексной модели ветра, волн и обледенения, разработанной в ААНИИ. Результаты численных расчетов по комплексной модели для акватории Баренцева моря сопоставлены со штормовыми предупреждениями Гидрометслужбы.

Ключевые слова: брызговое обледенение, численные методы расчета.

Обледенение судов относится к разряду опасных и особо опасных природных явлений. Оно часто наблюдается в приполярных районах Мирового океана, а также в дальневосточных морях, в Балтийском и даже Каспийском, Черном и Азовском морях. В высоких широтах опасности обледенения в той или иной степени подвергаются суда почти всех типов, независимо от их размеров, а также тактико-технических данных. До сих пор обледенение судов продолжает оставаться опасным явлением, которое приводит к гибели людей и аварийным последствиям, снижает эффективность работы флота и гидротехнических сооружений. По имеющимся данным [Опасные и ледовые явления..., 2010], за период с 1908 по 2009 г. от обледенения погибло около 1000 человек на 119 судах.

Наиболее распространенным и опасным видом морского обледенения является брызговое обледенение, так как образующийся при этом лед отличается значительной прочностью и плотностью, а сила его сцепления с поверхностью выше, чем при обледенении, вызванном другими причинами.

На степень брызгового обледенения влияют отрицательные температуры воздуха, ветер, волнение и, в меньшей мере, температура воды. Наличие всех этих факторов является неперенным условием, при котором происходит брызговое обледенение. Скорость или интенсивность брызгового обледенения, в свою очередь, зависит от типа судна, загрузки, направления и скорости ветра, развития ветрового волнения, а также от совершаемого маневра и других технических характеристик, относящихся к судну. Поэтому, поставив задачу прогноза интенсивности обледенения судна данного типа, следует иметь в виду комплексность задачи и трудность ее реализации для всех классов судов.

В настоящее время в практике работы Росгидромета, капитанов и штурманов, а также проектных организаций установлены следующие градации обледенения и соответствующие им сочетания метеорологических величин [Методические указания..., 1972]:

– медленное обледенение происходит при любой скорости ветра и температуре воздуха от -1 до -3 °С, а также при скорости ветра $0-9$ м/с и температуре воздуха ниже -3 °С;

– быстрое обледенение происходит при скорости ветра $9-15$ м/с и температуре воздуха от -3 до -8 °С;

– очень быстрое обледенение происходит при скорости ветра свыше 15 м/с и температуре воздуха ниже -3 °С, а также при скорости ветра $9-15$ м/с и температуре воздуха ниже -8 °С.

Согласно последнему наставлению по службе прогнозов Росгидромета [Наставление по службе прогнозов, 2011] интенсивность обледенения рыболовных судов характеризуется следующими терминами:

– медленное: скорость отложения льда на судне менее $0,7$ см/ч;

– быстрое: скорость обледенения от $0,7$ см/ч до $1,3$ см/ч (характеризуется как ОЯ);

– очень быстрое: скорость обледенения $1,4$ см/ч и более (характеризуется как ОЯ).

Подобные критерии интенсивности обледенения судов по комплексным гидрометеорологическим параметрам для судов типа СРТ получены канадскими и американскими исследователями [Pease, Comiskey, 1985; Overland et al., 1986; Overland, 1990; U.S.Navy, 1988] и представлены в настоящее время на сайте NOAA (<http://polar.ncep.noaa.gov/marine.meteorology/vessel.icing/>).

Для прогноза брызгового обледенения за рубежом широко используется метод Д.Оверлэнда. Он был разработан еще в середине 1980-х гг. Оверлэнд и др. [Overland et al., 1986] создали модель для прогноза обледенения малотоннажных рыбопромысловых судов. В отличие от отечественного метода [Методические указания..., 1972], основанного только на учете температуры воздуха и скорости ветра, этот метод позволяет дополнительно учесть температуру воды и температуру замерзания морской воды. Дальнейшие исследования Оверлэнда [Overland, 1990] позволили получить универсальное соотношение между обледенением судна, скоростью ветра, температурой замерзания воды, температурой воздуха и температурой поверхности воды. Соотношение имеет вид:

$$PPR = \frac{V_a(T_f - T_a)}{1 + 0,3(T_w - T_f)}, \quad (1)$$

где PPR – показатель обледенения (м·°С/с); V_a – скорость ветра в м/с; T_f – температура замерзания морской воды; T_a – температура воздуха и T_w – температура воды, в °С.

Метод предназначен для прогноза обледенения судов длиной от 20 до 75 м,двигающихся с нормальной скоростью в открытом море и не по направлению ветра.

На основании своих работ Оверлэнд составил таблицу интенсивности и скорости обледенения в зависимости от показателя обледенения (табл. 1).

Таблица 1

Таблица интенсивности и скорости обледенения в зависимости от показателя обледенения

Показатель прогноза PPR (м·°С/с)	<0	0–22,4	22,4–53,3	53,3–83,0	>83
Степень обледенения	льда нет	легкое	медленное	сильное	очень сильное
Скорость роста толщины льда, см/ч	0	<0,7	0,7–2,0	2,0–4,0	>4,0

Оценка интенсивности обледенения в различных условиях является одним из необходимых этапов при прогнозе обледенения судов. Под интенсивностью обледенения судна понимается скорость нарастания льда на всех конструкциях судна в целом. В отечественной практике она измеряется в т/ч, то есть вес отложений льда не зависит от размеров судна. При использовании метода Оверлэнда показателем интенсивности обледенения является скорость отложения льда, измеряемая в см/ч, что позволяет учесть геометрические особенности судна.

В настоящее время в службе погоды США прогнозы обледенения судов выполняются по методике (алгоритму) Оверлэнда для всей акватории Мирового океана и отдельных его частей (Атлантический океан, Тихий океан, Скандинавский район (0° до 80° в.д.)). Прогнозы выпускаются с дискретностью 6 часов с заблаговременностью 7 суток. Для оценки прогнозов предложены три категории скорости обледенения:

- 1) легкое (медленное) – от 0,1 до 0,8 дюймов нарастания льда за 3 часа;
- 2) среднее (умеренное) – от 0,8 до 2,4 дюйма за 3 часа;
- 3) сильное (опасное, тяжелое) – больше 2,4 дюйма за 3 часа.

На рис. 1 в качестве примера дан прогноз обледенения на 9 ноября 2011 г. с заблаговременностью 48 ч, выпускаемый службой погоды США для Скандинавского района, захватывающего Баренцево и Карское моря.

В ААНИИ в период с 1999 по 2002 г. разработана опытная версия комплексной модели ветра, волн и обледенения судов типа СРТ, учитывающая кроме скорости ветра на 10-метровом горизонте и температуры воздуха на высоте двух метров интенсивность ветрового волнения (значительную высоту волны 13 %-й обеспечен-

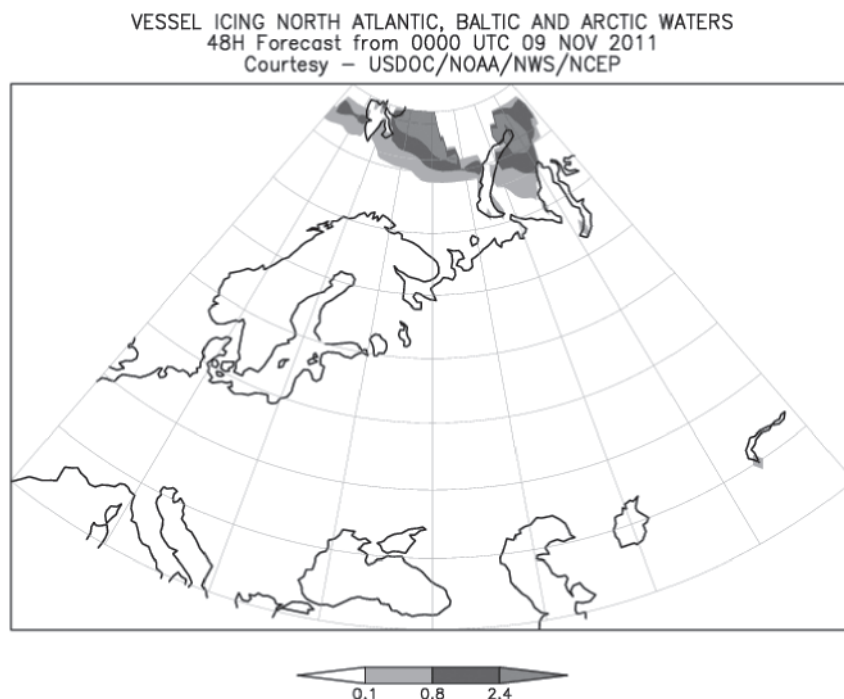


Рис. 1. Пример прогноза обледенения судов, выпускаемый службой погоды США.

ности). В этой работе большое участие принимал В.В.Панов, чьи работы по вопросам, посвященным проблеме обледенения судов, широко известны [*Теоретические и экспериментальные исследования...*, 1971; *Панов, Шмидт, 1971; Панов, 1976; Опасные и ледовые явления...*, 2010].

Расчет и прогноз параметров ветрового волнения и скорости обледенения происходит по спектрально-параметрической модели, разработанной в ЛО ГОИН и модифицированной в ААНИИ. Более подробное описание модели приводится в публикациях [*Дымов, Пасечник, 1994; Лавренов, 1998*]. Основными входными данными в расчетах и прогнозах являются поля атмосферного давления на уровне моря (или составляющие скорости ветра на высоте 10 м), температура воздуха на высоте 2 м, а также батиметрические данные в узлах расчетной сетки. Положение кромки льда задается путем ежедневного усвоения спутниковых многоканальных микроволновых данных (SSM/I) по общей сплоченности морского льда. Модель адаптирована как для всего Мирового океана (глобальная версия), так и для отдельных акваторий и морей (моря Российской Арктики и Дальнего Востока, Балтийское, Черное и Каспийское моря – региональные версии).

В комплексной модели ветра, волн и обледенения используются градации скорости обледенения судов типа СРТ, принятые Росгидрометом [*Методические указания...*, 1972]. Результаты ее работы могут быть представлены в графическом виде, включающем в себя не только степень обледенения судов, но и скорость ветра и высоту волн (см. рис. 2–4), что с точки зрения информативности выгодно отличается от прогноза обледенения службы погоды США (см. рис. 1). Временная дискретность и заблаговременность прогнозов в комплексной модели определяются входными метеорологическими параметрами. В настоящее время – от 72 до 120 ч, с шагом 6 ч. К сожалению, верификацию модели проводить очень сложно, так как сведения об обледенении, поступающие с судов, немногочисленны и труднодоступны, а также не всегда достоверны (иногда даже противоречивы).

Штормовые предупреждения об обледенении судов, выпускаемые Гидрометслужбой, как правило, не дают подробного представления о степени обледенения по всей акватории моря. Но их все же можно сопоставить с расчетами по комплексной модели ветра и волн и обледенения. В качестве примера рассмотрим два случая из сообщений РИА Новости: от 14 ноября 2011 г. и от 17 апреля 2009 г.

Первое сообщение можно посмотреть на сайте новостей ВНИИГМИ МЦД (<http://www.meteo.ru/news/index.php?start=100>). Оно касается штормового предупреждения Мурманского УГМС.

В штормовом предупреждении Мурманского УГМС от 14 ноября 2011 г. сообщалось: «14 ноября в 16–20 часов ожидается усиление северо-западного ветра: на севере Мурманской области, в г. Мурманске, в Кольском заливе в порывах 25–30 м/с, на юге области 18–23 м/с, на побережье Мурманска 35–40 м/с. Снег с видимостью 500–1000 м, сильная метель. Высота волны на побережье Мурманска 6,0–7,0 м. Опасные условия сохранятся до 12–15 часов 15 ноября. 14–15 ноября в Баренцевом море ожидается быстрое обледенение судов при северном ветре 30–33 м/с».

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета по комплексной модели ветра, волн и обледенения судов (численные прогностические расчеты на 18 ч для 14 и 15 ноября 2011 г.). Как видно из рис. 2, к вечеру 14 ноября над акваторией Баренцева моря действительно имел место северный ветер до 30 м/с, и расчетная значительная

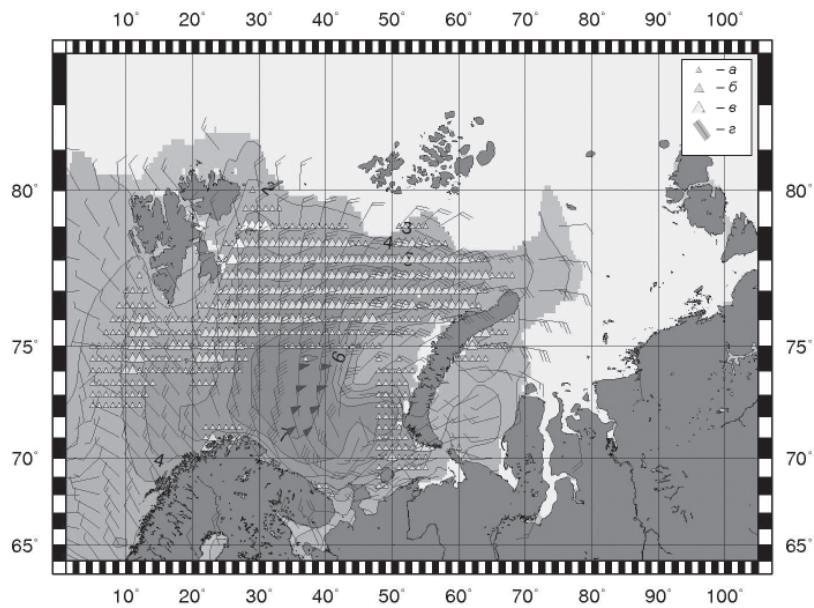


Рис. 2. Пример прогноза обледенения судов, выпускаемый в ААНИИ с помощью комплексной модели ветра, волн и обледенения (прогностический расчет на 18 ч 14 ноября 2011 г.):

a – медленное обледенение; *b* – быстрое обледенение; *c* – очень быстрое обледенение; *z* – значительная высота волн в метрах.

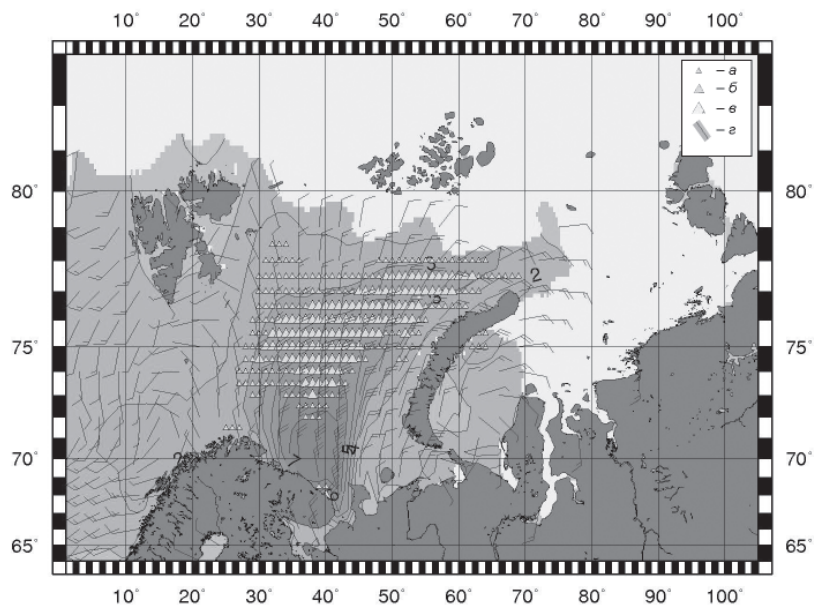


Рис. 3. Пример прогноза обледенения судов, выпускаемый в ААНИИ с помощью комплексной модели ветра, волн и обледенения (прогностический расчет на 18 ч 15 ноября 2011 г.).

Усл. обозн. см. на рис. 2.

высота волн у побережья Мурманска достигала 5–6 м, что соответствует штормовому предупреждению. Опасные условия сохранялись в течение суток (см. рис. 3). Наибольшая высота волн (более 10 м) была рассчитана на 06 ч 15.11.2011 г., в конце дня высота волн превышала 7 м (см. рис. 3).

14 и 15 ноября на акватории Баренцева моря создались условия для медленного и быстрого обледенения судов, причем 14 ноября область быстрого обледенения занимала значительную часть моря севернее 75° с.ш., а 15 ноября она стала сокращаться и смещаться к югу моря. Таким образом, прогноз обледенения, полученный с помощью комплексной модели, не противоречит штормовому предупреждению Мурманского УГМС и позволяет увидеть пространственно-временную картину этого очень опасного явления.

В качестве второго примера для сопоставления расчетов по комплексной модели с имеющейся информацией об обледенении используем сообщение РИА Новости от 17 апреля 2009 г. (19:56) (<http://eco.ria.ru/weather/20090417/168447098.html>).

«Циклон над Кольским полуостровом принес снегопад и метель в Мурманскую область и вызовет шторм в Баренцевом море с волнами до 4 метров, видимость в море при снеге не превысит километра, будет наблюдаться обледенение судов», – сообщает на сайте «Метеоновости».

«Циклон обусловит штормовую погоду на Баренцевом море. Ветры в порывах 15–20 метров в секунду поднимут волны высотой 2–4 метра, при снеге видимость не превысит 500–1000 метров, будет наблюдаться медленное обледенение судов», – говорится в сообщении.

Поскольку сообщение дано в конце дня, то на рис. 4 приводим результаты прогностического расчета по модели на 18 ч 17 апреля 2009 г.

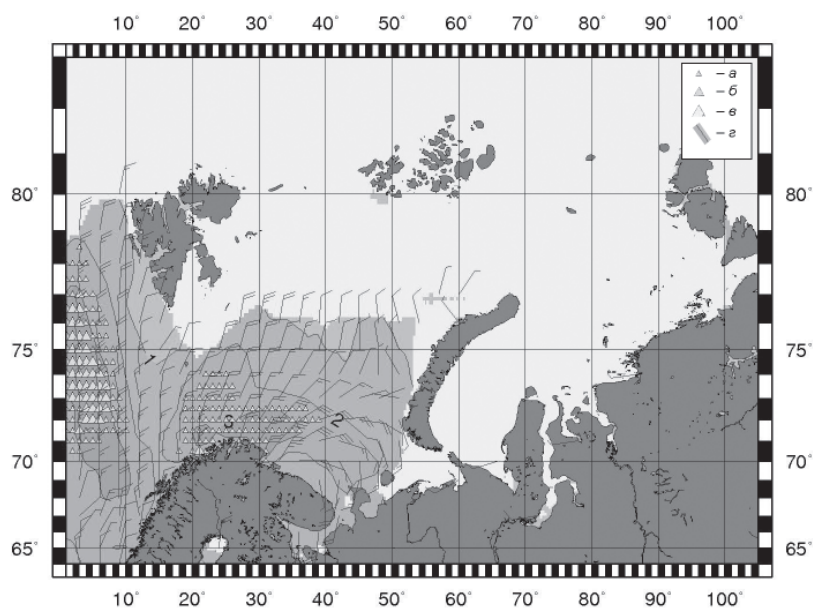


Рис. 4. Пример прогноза обледенения судов, выпускаемый в ААНИИ с помощью комплексной модели ветра, волн и обледенения (прогностический расчет на 18 ч 17 апреля 2009 г.).

Усл. обозн. см. на рис. 2.

Из рис. 4 видно, что скорость ветра действительно достигает 15 м/с и выше, значительная высота волн составляет более 3 м и на акватории моря имеется большая область, где по комплексной модели ААНИИ рассчитано медленное обледенение судов. Таким образом, расчет по модели подтверждает сообщение РИА Новости.

В заключение хотелось бы отметить, что в отличие от методики Оверленда, используемой службой погоды США, численный метод расчета и прогноза брызгового обледенения судов на основе комплексной модели ветра, волн и обледенения, разрабатываемый в ААНИИ, учитывает высоты волн, что, в свою очередь, позволяет рассчитывать интенсивность обледенения судов в условиях появления существенных волн зыби (малые скорости ветра). Для более детальной верификации методов расчета брызгового обледенения судов требуются достоверные экспериментальные данные о скорости нарастания льда при различных метеорологических условиях, т.е. экспедиции в районах с наиболее вероятным возникновением этого особо опасного явления. К сожалению, такие эксперименты в настоящее время не проводятся.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по Госконтракту № 16.515.11.5074.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дымов В.И., Пасечник Т.А.* Параметрические модели численного прогноза ветрового волнения: Руководство по морским гидрологическим прогнозам. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 525 с.
- Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 500 с.
- Методические указания по предупреждению угрозы обледенения судов / Под ред. Борисенкова Е.П., Пчелко И.Г. Л.: ААНИИ, 1972. 81 с.
- Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. С. 51.
- Опасные и ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
- Панов В.В.* Обледенение судов // Тр. ААНИИ. 1976. Т. 334. 264 с.
- Панов В.В., Шмидт М.В.* Градации гидрометеорологических комплексов обледенения с учетом степени их опасности для судна // Проблемы Арктики и Антарктики. 1971. Вып. 38. С.120–124
- Теоретические и экспериментальные исследования условий обледенения судов / Под ред. Борисенкова Е.П. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 206 с.
- Overland J.* Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures // J. Weather and Climate. 1990. Vol. 5. P. 62–77.
- Overland J., Pease C., Preisendorfer W., Comiskey A.* Prediction of Vessel Icing // J. Climate Appl. Meteor. 1986. Vol. 25. № 12. P. 1793–1806.
- Pease C.H., Comiskey A.L. Vessel Icing in Alaskan Waters – 1979 to 1984 data Set. Pacific marine Environmental Laboratory, U.S. National Oceanic & Atmospheric Administration, Seattle, WA. 1985. NOAA Data Report REL PMEL–14. 16 p.

U.S. Navy. Cold Weather Handbook for Surface Ships. 1988. OPNAV P-03C-01-89, Chief of Naval Operations, Washington DC. URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA247850> [дата обращения 21.05.12.].

V.I.DYMOV, N.P.YAKOVLEVA, T.A.PASECHNIK, V.V.ALEXEEV

NUMERICAL METHODS FOR THE SEA-SPRAY VESSEL ICING

A couple of numerical methods for the sea-spray vessel icing are examined. The Overland method used by the National Weather Service (USA) and the method for sea-spray vessel icing based on the complex model for wind, waves, and icing, developed by AARI are considered. The hindcasts and forecasts for the Barents sea, produced by the complex AARI model, are compared to the storm warnings issued by Hydrometeorological Centre of Russia.

Keywords: sea-spray vessel icing, numerical methods.