

## Эффективность нефтесборных устройств в ледовых условиях и методы её повышения

© 2021. А. В. Сальников, к. т. н., начальник технической службы,  
ООО «Транснефть – Порт Приморск»,  
188910, Россия, Ленинградская область,  
Выборгский район, г. Приморск, а/я 4,  
e-mail: ugtusovet@yandex.ru

В статье представлен мировой опыт испытаний по оценке эффективности нефтесборных устройств (скиммеров) различных конструкций при их эксплуатации при пониженных температурах и в ледовых условиях. Рассмотрены условия и факторы, влияющие на эффективность скиммеров при такой эксплуатации, а также пути и методы её повышения. Определены показатели, позволяющие количественно оценить эффективность реализации механического метода ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, и проанализированы на предмет применимости в условиях ледовой обстановки.

Актуальность статьи связана с постоянной потребностью повышения промышленной безопасности при работе на водных (морских) объектах, акваториях и использования энергетической ценности отработанных нефтяных отходов. Новизна обусловлена детальным анализом опыта тестирования существующих современных нефтесборных устройств и оценкой их эффективности в ледовых условиях.

**Ключевые слова:** ликвидация разлива нефти, утилизация нефтяных отходов, ледовые моря, сплочённость льда, шуга, битый лёд, скиммеры, нефтесборное оборудование.

## The effectiveness of oil gathering devices in ice conditions and methods for its increase

© 2021. A. V. Salnikov ORCID: 0000-0002-9768-5522,  
Transneft – Primorsk port, LLC,  
PO Box 4, Primorsk, Vyborgsky District,  
Leningrad Region, Russia, 188910,  
e-mail: ugtusovet@yandex.ru

The article presents the world experience of testing to assess the effectiveness of oil-gathering devices (skimmers) of various designs during their operation at low temperatures and in ice conditions. The conditions and factors affecting the efficiency of skimmers during such operation, as well as ways and methods of its improvement are considered. Indicators are determined that allow to quantify the effectiveness of the implementation of the mechanical oil spill response method, and analyzed for applicability in ice conditions.

The relevance of the article is associated with the constant need to improve industrial safety when working at water (marine) objects and water areas and the use of the energy value of oil waste. The novelty is due to a detailed analysis of the experience of testing modern existing oil-gathering devices and an assessment of their effectiveness in ice conditions.

**Keywords:** oil spill response, disposal of oil waste, icy seas, ice concentration, sludge ice, broken ice, skimmers, oil gathering equipment.

Обеспечение утилизации значительного объёма нефтяных отходов, возникающих в процессе эксплуатации объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, с соблюдением действующих экологических норм, является затратным процессом. В то же время такие отходы обладают определённой энергетической ценностью, а развитие техно-

логий их использования в качестве топлива не только снижает затраты на хранение и утилизацию, но и позволяет достичь значительного энергосберегающего эффекта [1–4]. При ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на водных акваториях Крайнего Севера и арктической зоны указанные выше задачи приобретают особую актуальность,

при этом вовлечение нефтяных отходов в энергооборот возможно только при их сборе механическим способом.

Несмотря на значительные проблемы использования скиммерных систем в условиях ледовых морей [3, 5–8], их применение остаётся действенным методом ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (ЛАРН) в мелкобитом льду с размером льдин до 2 м и показателем сплочённости от 3 до 7 баллов [4, 5–7]. При этом, в случае, когда размер ледовых образований не превышает 0,1 м, ледяные иглы, сало, снежура, шуга и обломки льда, как правило, собираются нефтесборщиками вместе с нефтью [5, 8–11].

Целью данной работы является обобщение и анализ мирового опыта испытаний по оценке эффективности скиммеров различных конструкций, проведённых в ледовых условиях и при пониженных температурах, для определения количественных показателей, позволяющих оценить эффективность таких скиммерных устройств, а также анализ условий и факторов, влияющих на эффективность механической уборки нефтяных разливов в ледовых условиях, для определения путей и методов её повышения.

### Классификация скиммерных устройств для ЛАРН в ледовых условиях

Все системы сбора, применяемые в мировой практике для ЛАРН на морских аквато-

риях, можно разделить по принципу действия на три категории (рис. 1):

- гравитационные (пороговые), в которых тонкий поверхностный слой нефти протекает через пороговое устройство в специальную область под скиммером для дальнейшего отделения от воды и откачки в нефтесборную ёмкость;

- вакуумные (всасывающие), в которых поверхностный слой водонефтяной эмульсии всасывается в отстойно-вакуумный резервуар, после чего нефть отделяют от воды;

- адгезионные (олеофильные), основанные на использовании в конструкции скиммеров олеофильных поверхностей [6, 12, 13].

Гравитационные скиммерные системы отличаются простотой конструкции, эксплуатационной надёжностью и малочувствительны к изменению вязкости собираемых продуктов. Однако при ликвидации разлива высоковязких нефтей и нефтепродуктов при низких температурах такими системами зачастую требуется дополнительное введение воды в собранную эмульсию либо её подогрев для перекачки в сборный резервуар.

Вакуумные системы сложны по конструкции и в эксплуатации, а их применение затруднительно для сбора тяжёлых нефтей и исключено по противопожарным соображениям для легкоиспаряющихся нефтепродуктов [14–16].

Кроме того, гравитационные и вакуумные системы характеризуются значительной

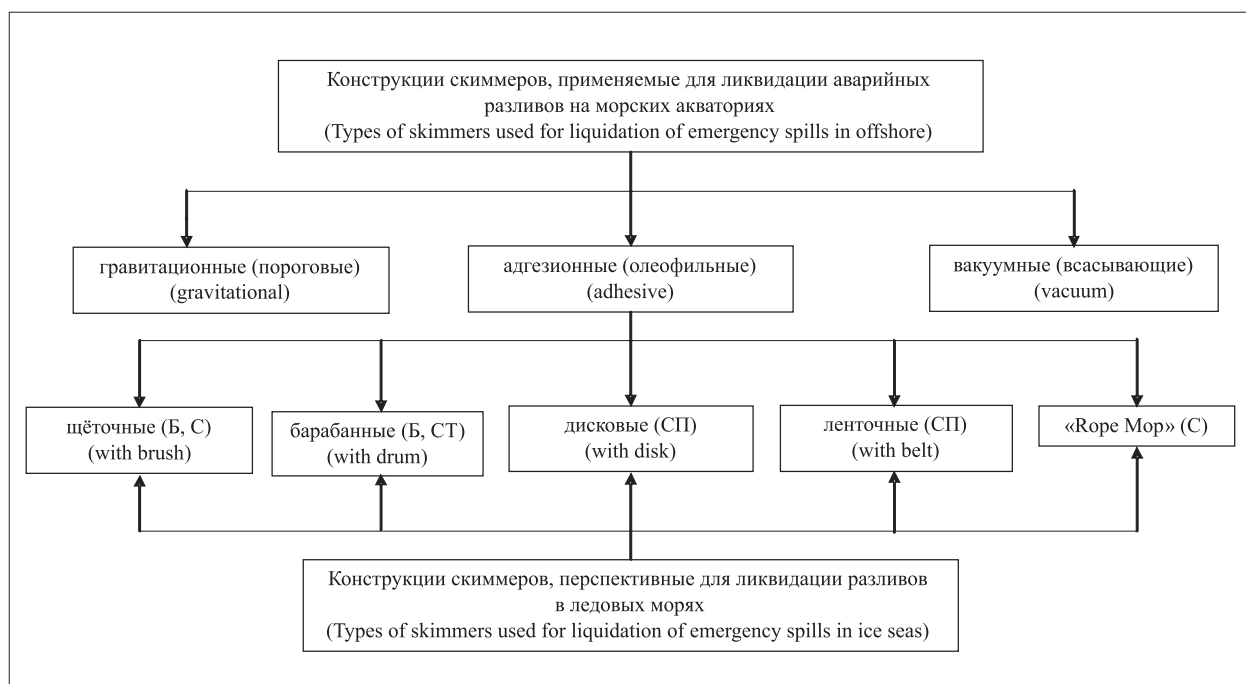


Рис. 1. Классификация скиммеров / Fig. 1. Skimmer classification

обводнённости собранной нефти, подразумевающей наличие в составе данных систем резервуаров большого объёма и насосов высокой производительности, что при реализации ЛАРН в ледовых условиях приводит к значительному росту экономических и ресурсных затрат.

Этого недостатка лишены адгезионные системы сбора, поскольку отделение нефти и нефтепродуктов от водонефтяной эмульсии происходит одновременно с процессом сбора за счёт конструктивных особенностей скиммера, когда извлечённые из эмульсии за счёт сил адгезии углеводороды удаляются с рабочих олеофильных поверхностей механическим способом, например, при помощи скребковых и гребнечесальных механизмов или отжимных (роллерных) устройств [17, 18].

По способу передвижения скиммеры можно подразделить на:

- стационарные (СТ) – используются в закреплённом положении, как правило, в соединении с боновыми ограждениями;
- буксируемые (Б) – передвигаемые судами, кранами и выносными стрелами по направлению нефтяного пятна, чем обеспечивается подача разлитого продукта к всасывающей системе скиммера;
- самоходные (С) – скиммеры, оборудованные двигателями, запитанными от находящегося неподалёку судна;
- стационарно-передвижные (СП) – обычно используются в стационарном режиме, но также могут медленно передвигаться как самостоятельно, так и при помощи буксировки [19–22].

Щёточные скиммеры используются в режиме движения по воде (Б, С). Большинство конструкций дисковых скиммеров стационарны, но некоторые из них могут также работать и в двигающемся режиме (СП). Обычно барабанные скиммеры стационарны (СТ), но также могут быть использованы совместно со специальным судном (Б), что позволяет использовать их в двигающемся режиме. Ленточные скиммеры могут использоваться как стационарно, так и в движении, в зависимости от конфигурации (СП). Скиммеры типа «Роуп Мор», в которых олеофильными поверхностями являются трос-швабры – длинные петли, закреплённые на канате, используются в стационарном режиме (СТ).

В 1992 г. обнародованы результаты исследований, выполненных по заказу Канадской нефтяной ассоциации (Canadian Petroleum Association) [7, 23, 24]. Проведённые изы-

скания позволили сделать вывод о том, что щёточные и щёточно-барабанные олеофильные скиммеры обладают максимальным потенциалом для ликвидации разливов нефти в ледовых условиях. Данная работа послужила отправной точкой для развития механического метода ЛАРН на замерзающих акваториях.

### Проект MORICE

Полученные в ходе работ выводы были подтверждены в результате совместной работы норвежских, канадских, американских и немецких исследователей в рамках проекта MORICE (Mechanical Oil Recovery in Ice) с 1996 по 2000 гг. [7].

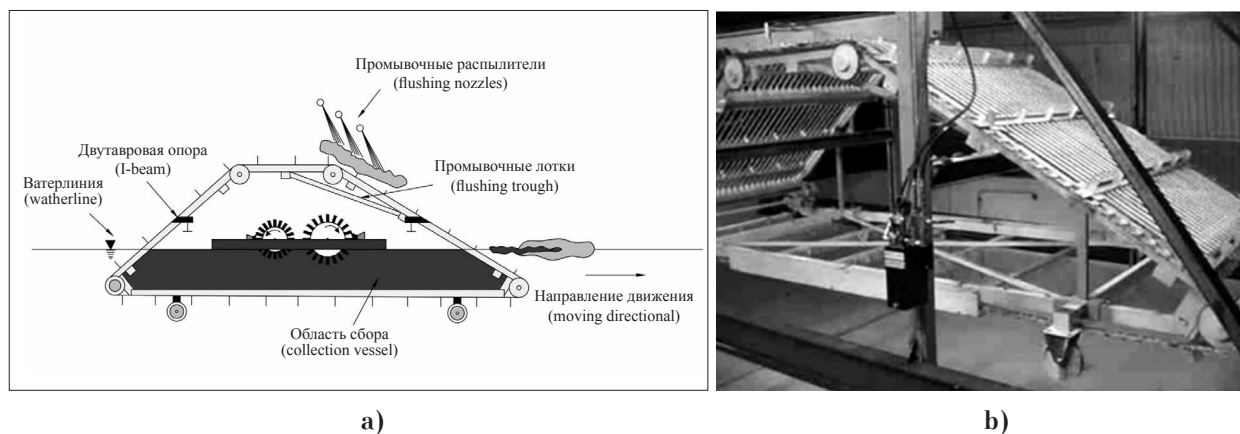
В ходе исследований [8] были отобраны и испытаны в ледовых условиях в Гамбургском ледовом закрытом бассейне и в Прадхо-Бей (море Бофорта) четыре щёточных и щёточно-барабанных олеофильных скиммерных устройства: Aqua-Guard RBS-10 (Канада), Lori BD и Lori BP (Финляндия), а также разработанный непосредственно в ходе проекта MORICE BD, оснащённый шнековой подачей флюида.

Особое внимание при проведении исследований уделялось эффективности работы скиммеров совместно с подъёмным решётчатым конвейером (рис. 2) [8].

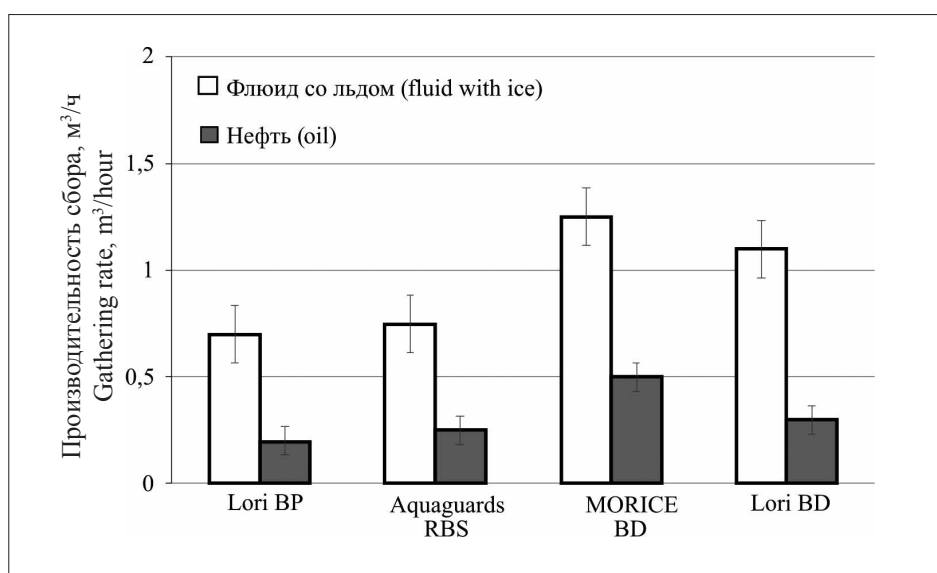
Испытания в Гамбургском ледовом бассейне проходили при температурах воздуха в диапазоне  $-5-0$  °С. Сплочённость льда достигала 70%. В качестве модельной нефти использовалось судовое топливо марки IFO-45 (вязкость при  $-1$  °С составляла 1300 сП при скорости сдвига  $10$  с<sup>-1</sup>).

Для обеспечения чистоты эксперимента полевые испытания проводились на той же модельной нефти, что и в Гамбургском ледовом бассейне. Температура воздуха при проведении испытаний находилась в диапазоне от  $-2$  до  $-10$  °С, температура воды –  $-0,6-0$  °С. Сплочённость льда составляла порядка 80%.

В ходе полевых исследований в Прадхо-Бей (море Бофорта, Аляска) результаты тестирования совместной работы модифицированной модели Lori BD и подъёмного решётчатого конвейера в ледовых условиях были оценены как положительные. Несмотря на то, что толщина ледовых образований достигала 15 см, накопления значительного количества льда внутри конвейера перед скиммером отмечено не было. Размеры фрагментов льда, извлечённых из собранного



**Рис. 2.** Подъёмный решётчатый конвейер (ПРК):  
 а – принципиальная схема работы ПРК; б – установка конвейера в бассейне [8]  
**Fig. 2.** Lifting grated belt (LGB): a – LGB work concept; b – LGB installed in the testing pool [8]



**Рис. 3.** Сравнительные результаты проекта MORICE  
**Fig. 3.** Comparative results of the MORICE project

скиммером флюида, составляли порядка 5 см, твёрдость и сплочённость шуги в ходе полевых испытаний была меньше модельной, применяемой при аналогичном тесте в Гамбургском ледовом бассейне.

Наибольшую эффективность при полигонных и полевых исследованиях продемонстрировал разработанный непосредственно в ходе проекта MORICE щёточно-барабанный скиммер, получивший одноимённое название (рис. 3).

Конструкция скиммера MORICE BD (рис. 4) включает в себя передний барабан диаметром 45 см и барабан диаметром 32 см, установленный позади него.

Большой барабан предназначен для ледоотклонения и сбора нефти со льда, для чего его

щетина имеет большую жёсткость, чем щетина меньшего барабана, предназначенного только для нефтесбора. Конструкция скиммера позволяет регулировать установку каждого барабана по высоте для изменения глубины погружения в воду.

Два гидравлических мотора приводят барабаны в движение, причём вращение барабанов разнонаправлено: большой барабан вращается по часовой стрелке, малый – против часовой. Каждый из щёточных барабанов имеет персональное скребковое устройство и жёлоб для собранного флюида. Винтовые шнеки, установленные в жёлобах, приводятся во вращение гидравлическим приводом и подают собранный флюид в центр жёлобов, где подсоединены шланги перекачивающих насосов.

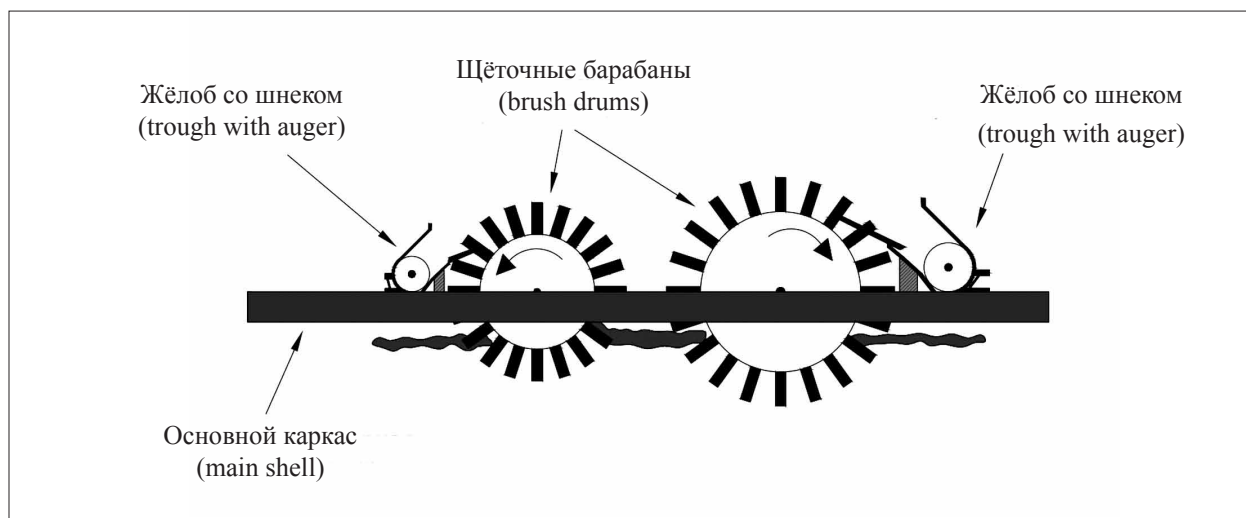


Рис. 4. Принципиальная схема работы скиммера MORICE BD  
 Fig. 4. MORICE BD skimmer work concept

### Совместная отраслевая программа по предотвращению разливов нефти в Арктике и покрытых льдом водах

В период с 2006 по 2009 годы Фондом научных и промышленных исследований SINTEF и шестью нефтегазовыми компаниями (Statoil, Shell, ConocoPhillips, Chevron, Agip KCO и Total) была реализована Совместная отраслевая программа по предотвращению разливов нефти в Арктике и покрытых льдом водах (The Joint Industry Program on oil spill contingency for Arctic and ice-covered waters – JIP Oil in Ice). Программа завершилась двумя полевыми испытаниями скиммеров в Баренцевом море в 2008 и 2009 гг. [9].

В ходе Программы в ледяном бассейне SINTEF были испытаны в присутствии шуги и небольших льдин (размером до 1 м) при температуре воздуха до  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  пять моделей скиммеров, две из которых – щёточно-барабанный LRB 150 производства Lamor (Финляндия) и пороговый щёточный Helix 1000 фирмы DESMI (Дания) – отобраны по результатам исследований для полевых испытаний в Баренцевом море в мае 2008 г., как потенциально перспективные для использования в ледовых условиях [8, 9]. Испытания в Баренцевом море проходили с мазутом IF-30 (6–8 сП) при температурах воздуха и воды до  $-10$  и  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Базовая модель стационарно-передвижного скиммера LRB 150 предназначена для эксплуатации в ледовых условиях при помощи крана и активно использовалась в то время для

ликвидации разливов нефти в ледовых водах Финляндии. В ходе полевых испытаний 2008 г. скиммер был испытан на открытой воде, при сплочённости мелкобитого льда 50–90% и наличии шуги при толщине слика 20–25 см. Для имитации шуги в ходе полевых испытаний был использован мелкодроблённый морской лёд. Несмотря на положительные результаты тестирования при наличии шуги, с повышением сплочённости льда эффективность скиммера резко снижалась.

В ходе полевых испытаний кольцевой стационарно-передвижной скиммер Helix 1000 был испытан на открытой воде, при сплочённости мелкобитого льда 50% и наличии шуги при толщине слика 10–15 см. Результаты испытаний были признаны неудовлетворительными, вследствие чего конструкция скиммера Helix 1000 была значительно изменена. Модифицированная модель получила название Polar Bear и была испытана в ледовом бассейне SINTEF [12] и в полевых условиях в Баренцевом море в мае 2009 г. на открытой воде, при сплочённости мелкобитого льда 30–70% и наличии шуги при толщине слика 7–10 см [13]. Проведённые модификации позволили значительно повысить эффективность скиммера при наличии шуги, однако эффективность в условиях мелкобитого льда ( $> 50\%$ ) осталась низкой.

Анализ результатов полевых испытаний скиммеров в ходе реализации проекта JIP Oil in Ice привёл к разработке принципиально новой конструкции скиммера для ледовых условий, которая была реализована норвежской фирмой FRAMO [9, 13].

Опыт полевых испытаний LRB 150, Helix 1000 и Polar Bear позволил разработчикам FRAMO выбрать оптимальные параметры щетины, барабанов и поплавков для обеспечения плавучести и осадки скиммера. Кроме того, для обеспечения манёвренности и возможности проникновения в карманы между битым льдом щёточно-барабанный скиммер FRAMO был спроектирован треугольной формы и оснащён управляемым оператором с судна подруливающим устройством в виде двух погружных винтов, что по прогнозам изготовителя позволит скиммеру быть эффективным при сплочённости льда более 70% [9, 13].

### Исследования Национального института по изучению разливов нефти и возобновляемой энергии (США)

В период с 18 февраля по 15 марта 2013 г. по инициативе Бюро безопасности и охраны окружающей среды Министерства внутренних дел США (U.S. Department of the Interior's Bureau of Safety and Environmental Enforcement – BSEE) были проведены полигонные испытания Skimmer Tests in Drift Ice: Ice Month 2013 at Ohmsett (SL Ross and MAR, 2013) десяти моделей олеофильных скиммеров различных конструкций, представленных на мировом рынке и потенциально пригодных для ЛАРН в арктических условиях [14, 25–28].

Тестирование проходило в открытом волновом бассейне американского Национального исследовательского центра ликвидации аварийных разливов нефти и возобновляемых источников энергии (OHMSETT) с имитацией сплочённости в 30 и 70% выращенным из морской воды льдом. Температура воды во время проведения испытаний составляла от 0 до 3 °С, а её солёность – 30,5‰. Для имитации сырой нефти Alaska North Slope (ANS) в арктических условиях использовалось смазочное масло Hidrocal 300. Толщина slicka при проведении испытаний составляла 25 мм.

Все скиммеры, кроме JBF DIP 400, проходили испытание в огороженной болами площади 7,6 × 12,8 м в стационарном положении или с медленной буксировкой краном. Скиммер JBF DIP 400 тестировался на большей площади (7,6 м × 30,5 м) из-за специфики конструкции, требующей горизонтального продвижения в направлении нефтяного пятна.

JBF DIP 400 – единственный из тестируемых скиммеров, использующих в работе принцип динамической наклонной плоскости

(Dynamic Inclined Plane – DIP), когда нефть, находящаяся на поверхности воды, попадает в рабочую зону скиммера при его продвижении и толкается под скиммер нисходящим олеофильным ремнём. Затем нефть из-под скиммера засасывается в сборный шланг для перекачки в сборную ёмкость [29–33].

Буксировка JBF DIP 400 со скоростью 0,51 м/с в ходе испытаний осуществлялась за счёт движения буксировочного моста бассейна, передвигающегося вдоль бассейна и предназначенного для симуляции реальной буксировки или движения потока со скоростью до 3,3 м/с.

Скиммер DESMI Sea Mop 3060 является типичным представителем олеофильных скиммеров типа «Rope Mop», в которых олеофильными поверхностями являются трос-швабры.

Рабочими органами данного скиммера являются три канатные петли, вращающиеся в слике для сбора нефти. Desmi Sea Mop 3060 в процессе работы всегда остаётся подвешенным надо льдом при помощи крана, поэтому сплочённость льда не оказывает влияния на его продвижение.

Конструкции барабанных олеофильных скиммеров без щетины были представлены на испытаниях двухбарабанным скиммером Elastec TDS 118G и четырёхбарабанным скиммером Elastec Magnum 100G.

Класс безщетинных дисковых скиммеров был представлен на испытаниях скиммером Elastec X30. Рабочим органом скиммера является вертикальный рифлёный диск диаметром 760 мм, имеющий на торце и боковых плоскостях олеофильные желобки и вращающийся по направлению нефтяного slicka. Нефть, прилипая к олеофильным поверхностям, увлекается под скиммер, где собирается и откачивается в сборную ёмкость [34–36].

Продукция финской фирмы LORI была представлена на испытаниях в бассейне OHMSETT дисковым щёточным скиммером LORI Mini. Пакет из семи щёточных дисков вращается в направлении нефтяного slicka, увлекая нефть внутрь скиммера, где щетина очищается от нефти в верхней точке скребковым механизмом. Конструкция LORI Mini оснащена устройствами плавучести.

Финская фирма Lamog предоставила для сравнительных испытаний две модели скиммеров: ленточный скиммер LAM50, оснащённый щёточным конвейерным ремнём с возможностью реверсивного движения, и щёточно-барабанный скиммер LRB 150,

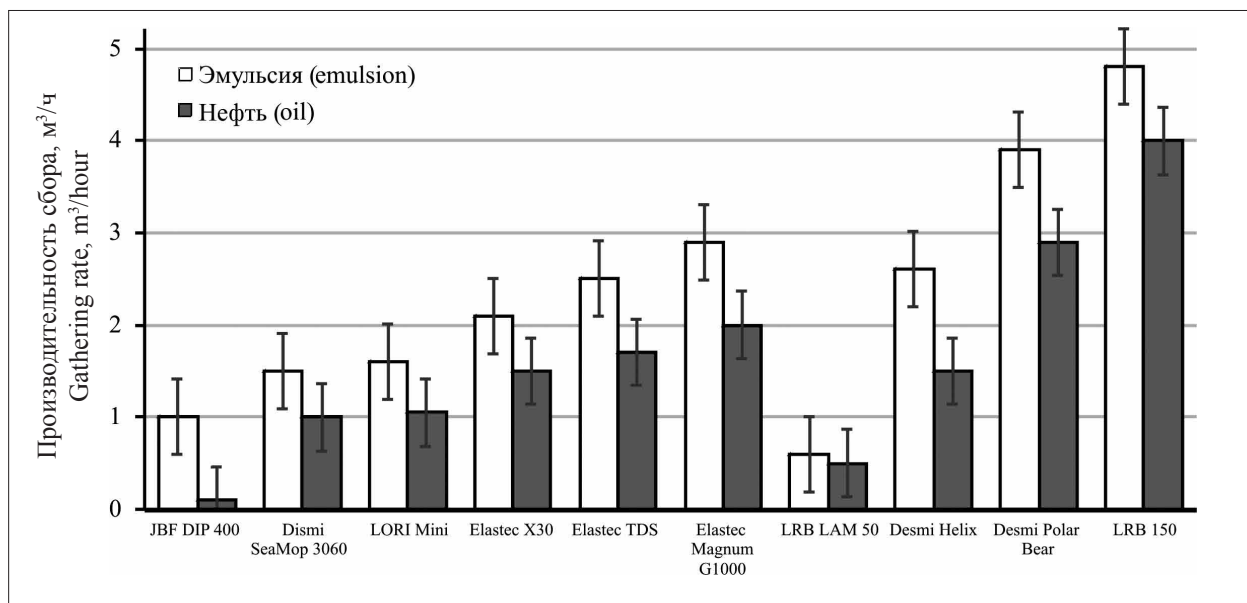


Рис. 5. Сравнительные результаты испытаний скиммеров в бассейне OHMSETT при сплочённости льда 70%

Fig. 5. Comparative test results of skimmers in the OHMSETT basin with 70% ice concentration

прошедший полевые испытания 2008 г. в Баренцевом море [37–41].

Кроме модели **Sea Mop 3060**, датский производитель скиммеров DESMI на испытаниях в волновом бассейне OHMSETT был представлен пороговым щёточным скиммером Helix 1000, оснащённым элементами плавучести, и щёточно-дисковым скиммером Polar Bear, конструкция которого была разработана в ходе Программы JIP Oil in Ice. Оба скиммера прошли полевые испытания в Баренцевом море в 2008 и 2009 гг., описанные ранее в данной статье.

Каждый из представленных скиммеров был протестирован в двух степенях сплочённости льда (30% и 70%) по три раза. Эффективность при 30%, по большей части, соответствовала заявленной производителями, при сплочённости в 70% результативность скиммеров падала (рис. 5) [14, 15, 25–28].

### Заключение

В настоящее время в мировой практике выделяют два показателя, позволяющие количественно оценить эффективность реализации механического метода ЛАРН:

- производительность сбора нефти – ORR (Oil Recovery Rate), определяемая как объём нефти, отобранный скиммерным устройством за единицу времени;

- эффективность сбора нефти – ORE (Oil Recovery Efficiency), рассчитываемая как отно-

шение объёма отобранной нефти к объёму отобранного флюида (водонефтяной эмульсии).

Оценка по ORE и ORR в ледовых условиях вызывает некоторые затруднения при наличии шуги и ледяной каши и требует корректировки.

Проведение экспериментальных исследований в полигонных и полевых условиях с контролируемым разливом позволяет также оценить эффективность испытываемой модели скиммера по показателю эффективности, определяемому как отношение объёма собранной и деэмульгированной нефти к её разлитому объёму. Однако данная оценка является в определённой степени условной и может использоваться лишь для предварительного сравнения из-за доли погрешности, связанной с потерями разлитой нефти, например, при её инкапсуляции и адгезии ко льду, бонам, элементам самих скиммерных устройств, а также дисперсии в воду и неполной деэмульсации собранного флюида.

Эффективность ЛАРН с использованием скиммеров снижается в ледовых условиях за счёт следующих факторов:

- гидрометеорологические (ветер, волнение моря, снегопад, плохая видимость, низкая температура воды и воздуха), оказывающие воздействие на элементы скиммерных систем, вязкость нефти, персонал, интенсивность образования вторичного льда;

- ледовые образования (ледяные иглы, ледяное сало, снегура, шуга, битый лёд),

снижающие интенсивность притока нефти к нефтесборным устройствам и затрудняющие их продвижение, повышающие риск механических повреждений скиммеров, а также инкапсуляции нефти в лёд и адгезию к его поверхности.

Отдельно стоит выделить «человеческий» фактор. В работе [14] авторами было введено понятие «эффективность оператора». В ходе проводимых испытаний по оценке эффективности различных конструкций скиммеров в ледовых условиях длительность работ по ЛАРН увеличивалась с повышением сплочённости льда за счёт дополнительных временных затрат на поиск свободных карманов между ледовыми образованиями и перенос туда скиммеров.

Такие задержки во времени авторы [14] предложили оценить количественно, введя коэффициент эффективности оператора (ОП. EFF, %), рассчитываемый как отношение времени непосредственного сбора нефти скиммером к общей продолжительности испытания. Очевидно, что проведение работ в условиях низких температур и плохой видимости приведёт к повышению значения данного коэффициента.

Кроме того, при ведении работ с типами скиммеров, позволяющими регулировать скорость вращения щёток, барабанов и дисков, а также управлять движением самоходных нефтесборщиков, скорость и эффективность производства работ во многом будет зависеть и от опыта оператора.

Повысить эффективность скиммерных систем в ледовых условиях позволит ещё одна группа факторов, которые можно характеризовать как «конструктивные». Так, в первом приближении, к ним следует отнести адгезионные свойства материала рабочего органа, длину и жёсткость щетины, диаметр барабана, количество и скорость вращения щёточно-барабанных узлов, угол атаки «рабочий орган – очищаемая поверхность», размер отверстий в леодоотводных элементах и угол их наклона к поверхности ледовых образований, скорость продвижения скиммеров, их плавучесть и манёвренность.

Перспективным направлением в плане роста эффективности является также модификация и комбинирование систем подогрева и аэрации для управления вязкостью собираемого флюида, борьбы с обледенением конструктивных элементов и повышения качества очистки битого льда.

Ещё одним потенциально перспективным методом развития скиммерных систем

может стать технология ЛАРН, основанная на комплексном подходе, комбинирующем использование диспергирования нефтяного слика твёрдыми тонкодисперсными частицами с механической уборкой скиммерами повышенной эффективности, которая достигается за счёт применения магнитных полей, а также ультразвукового воздействия.

Повышение эффективности сбора нефти с водной поверхности в ледовых условиях делает экономически целесообразным вовлечение данного вида отходов в энергооборот в качестве топлива для блочно-модульных инсинераторных установок, что позволит снизить затраты на хранение, вывоз и утилизацию собранной нефти и использовать её энергетическую ценность для получения тепла на собственные нужды производств, расположенных в арктической зоне и на Крайнем Севере.

## References

1. Nikolaeva A.V., Kozhevnikov V.A., Chernykh V.A. Analysis of the potential for using waste oil products for own needs of “Transneft” // *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*. 2020. V. 10. No. 1. P. 70–83 (in Russian). doi: 10.28999/2541-9595-2020-10-1-70-83
2. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Energy efficient use of waste oil products as fuel // *Vestnik MEI*. 2020. No. 2. P. 42–51 (in Russian). doi: 10.24160/1993-6982-2020-2-42-51
3. Salnikov A.V., Gribov G.G. Issues of localization and elimination of oil spills in the Arctic seas // *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2016. No. 5. P. 30–34 (in Russian).
4. Mansurov M.N., Surkov G.A., Zhuravel V.I., Marichev A.V. Issues of localization and elimination of oil spills in the Arctic seas / Ed. M.N. Mansurova. Moskva: OOO “IRTs Gazprom”, 2004. 423 p. (in Russian).
5. Jensen H.V., McHale J. Mechanical oil recovery in ice infested waters (MORCE) // *Proc. of 2-nd “Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop”*. Mombetsu, 2000. P. 53–86.
6. Potter S., Byust I., Trudel K. Elimination of oil spills on the Arctic shelf / Ed. D. Shtolts. Moskva: Shell Exploration & Production Services, 2013. 140 p. (in Russian).
7. Solsberg L.B., McGrant M. State of the art review: oil-in-ice recovery // *Technical Report Number 92-02*. Prepared for the Canadian Petroleum Association, Alaska Clean Seas, Environmet Canada, and Marine Spill Response Corporation by Counterspell Research Inc. as part of the Task Force on Oil Spill Preparedness. Calgary, Can.: Canadian Petroleum Association, 1992. 57 p.
8. Jensen H.V., Solsberg I. The program for mechanical oil recovery in ice-infested waters // *MORICE, Phase 5*, Trondheim, Norway, Project No. 661222, 2001. 91 p.



9. Sørstrøm S.E., Brandvik P.J., Buist I., Daling P., Dickins D., Faksness L.G., Potter S., Rasmussen J.F., Singsaas I. Joint industry program on oil spill contingency for arctic and ice-covered waters // Summary Report, SINTEF, Trondheim, Norway, OilInIceJIP Report No. 32. 2010. 40 p.
10. Singsaas I., Leirvik F., Johansen B. Testing of Lamor GT 185 Skimmer and LRB 150 Skimmer in SINTEF ice basin // JIP Joint industry program on oil spill contingency for Arctic and ice covered waters, Trondheim, Norway, Project No. 800533, 2008. 21 p.
11. Singsaas I., Leirvik F., Johansen B. Testing of Ro-Clean Desmi ice skimmer and Helix skimmer in SINTEF ice basin // JIP Joint industry program on oil spill contingency for Arctic and ice covered waters, Trondheim, Norway, Project No. 800533, 2008. 18 p.
12. Leirvik F., Solsberg L., Johansen B. Testing of Ro-Clean Desmi Polar bear skimmer in SINTEF ice basin // JIP, task 3.2: Testing of new concept and units, Trondheim, Norway, Project No. 800533, 2010. 22 p.
13. Singsaas I., Sorheim K., Johansen B. Testing of oil skimmers via field experiments in the Barents Sea // JIP Joint industry program on oil spill contingency for Arctic and ice covered waters, Trondheim, Norway, Project No. 800533, 2010. 50 p.
14. Schmidt B., Meyer P., Potter S. Testing of oil recovery skimmers in ice at Ohmsett // OHMSETT The National Oil Spill Response Research & Renewable Energy Test Facility, Ottawa, Canada, Rpt: AMOP2014, 2014. 15 p.
15. ASTM, ASTM Annual book of standards, F2709, Standard test method for determining nameplate recovery rate of stationary oil skimmer systems // American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2013. 6 p.
16. Dickins D. Behavior of oil spills in ice and implications for Arctic spill response // Proceedings of the Arctic Technology Conference, Houston, TX: 2011: 22126, 2011. 15 p.
17. Buist I., Dickins D. Experimental spills of crude oil in pack ice // Proceedings 1987 International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute. Washington, 1987. P. 373–381.
18. Buist I., Dickins D., Majors L., Linderman K., Mullin J., Owens C. Tests to determine the limits to in-situ burning in Brash and Frazil ice // Proceedings Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar. No. 26. V. 2. Ottawa, Canada, 2003. P. 629–648.
19. Brandvik P.J., Faksness L.G. Weathering processes in Arctic oil spills: meso-scale experiments with different ice conditions // Cold Regions Science and Technology. 2009. No. 55. P. 160–166.
20. Yapa P.D., Weerasuriya S.A. Spreading of oil spilled under floating broken ice // Journal of Hydraulic Engineering. 1997. V. 123 (8). P. 676–683. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(676)
21. Dickins D.F. Associates Ltd., in association with Fleet Technology Ltd. Behaviour of spilled oil at sea (BOSS): oil-in-ice fate and behavior // Report to Environment Canada, U.S. Minerals Management Service and the American Petroleum Institute. Canada. August 1992. 200 p.
22. Farmer D., Li M. Behavior of oil spills in cold and ice-infested waters – analysis of experimental data on oil spreading // Proceedings of the 7th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. Environment Canada, 1994. P. 337–354.
23. Faksness L.G., Brandvik P.J. Dissolution of water soluble components from oil spills encapsulated in ice // Proceedings of the 28th Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar. Calgary, Canada, 2005. P. 59–73.
24. Gjøsteen K.Ø. A model for oil spreading in cold waters // Cold Regions Science and Technology. 2004. V. 38. No. 2–3. P. 117–125.
25. Guenette C.C., Sveum P. *In situ* burning of emulsions R&D in Norway // Spill Science and Technology Bulletin. 1995. V. 2. No. 1. P. 75–77. doi: 10.1016/1353-2561(95)00018-Y
26. Fingas M.F., Hollebone B.P. Review of behaviour of oil in freezing environments // Marine Pollution Bulletin. 2003. V. 47. P. 333–340. doi: 10.1016/S0025-326X(03)00210-8
27. Jensen H.V., Mullin J.V. MORICE-new technology for mechanical recovery in ice infested waters // Marine Pollution Bulletin. 2003. V. 47. No. 9–12. P. 453–469.
28. Johansen Ø., Skognes K. Oil drift in ice model // Oceanor report OCN 95026 to Offshore Operators Committee Nord, Stavanger, Norway. 1995. 23 p.
29. Løset S., Shkhinek K., Strass P., Gudmestad O.T., Michalenko E.B., Kärnä T. Ice conditions in the Barents and Kara Seas // Proceedings of the 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Yokohama, 1997. V. IV. P. 173–181.
30. Makshtas A., Marchenko A., Shoutilin S. New schemes of accounting ice ridges in models of sea ice cover dynamics // 17th International Symposium on Ice. St.-Petersburg, Russia, IAHR. 2004. V. 1. P. 61–68.
31. Marchenko A.V. On the propagation of discontinuities in a drifting ice cover // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1992. V. 56. No. 3. P. 346–358.
32. Payne J.R., McNabb Jr.G.D., Lon E. Hachmeister, Kirstein B.E., Clayton Jr.J.R., Phillips C.R., Redding R.T., Clary C.L., Smith G.S., Farmer G.H. Development of a predictive model for the weathering of oil in the presence of sea ice // U.S. Dept. Commerce, NOAA, OCSEAP Final Rep. 1987. V. 59. P. 147–465.
33. Reed M., Johansen Ø., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Science and Technology Bulletin, Elsevier. 1999. V. 5. P. 3–16.
34. Lepparanta M., Hakala R. The structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic Sea // Cold Region Science and Technology. 1992. V. 20. No. 3. P. 295–311. doi: 10.1016/0165-232X(92)90036-T

35. Bobra A.M., Fingas M.F. The behavior and fate of arctic oil spills // *Water Science Technology*. 1986. V. 18. No. 2. P. 13–23.

36. Claus G.F., Kuhnlein W.L. Efficiency of selected oil skimming systems in irregular seas // *Oil Spill Conference*. Washington, DC: American Petroleum Institute, 1991. P. 115–124.

37. Tscocalis E.T., Kpwenhoven W., Perkis A.N. A survey of classical and new response methods for marine oil spill cleanup // *Marine Technology*. 1994. V. 3. No. 1. P. 79–93.

38. Hammoud A.H., Assaf W.C., Khalil M.F. Performance of rotating coarse brush skimmer in oil spill recovery // *Proceedings of Third International Conference*

on Oil Spills, Oil Pollution and Remediation. Istanbul, Turkey, 2003. P. 139–153.

39. Smith J.B.H., McLellan C., Pintler L.R. Development of an oil skimming system to meet Navy specifications // *Oil Spill Conference*. San Diego: American Petroleum Institute, 1987. P. 91–94.

40. Topham D.R. An analysis of the performance of weir type oil skimmers // *Spill Science and Technology Bulletin*. 2002. V. 7. P. 289–297.

41. Rytönen J., Sassi J., Mykkänen E. Recent oil recovery test trials with ice in Finland // Presented at 26th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP); Technical Seminar, Victoria (British Columbia), Canada, 2003. P. 577–594.