



УДК 504.054, 656.62

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА-СБОРЩИКА В СИСТЕМЕ ВНЕСУДОВОЙ ОЧИСТКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ СУДОХОДСТВА

Манакова Маргарита Сергеевна, инженер, лаборатория электромагнитного окружения Земли, отдел геофизической электродинамики, ИПФ РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Васькин Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Аннотация. Рассмотрена многокритериальная оптимизация системы сбора судовых отходов в речном порту с помощью судна-сборщика. В результате численного моделирования были получены оптимальные значения характеристик судна-сборщика в зависимости от интенсивности судоходства и месторасположения приемных сооружений на внутренних водных путях.

Ключевые слова: внесудовая очистка, судовые отходы, экологическая безопасность, судно-сборщик, оптимизация.

В разработанной модели системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика рассматривается некий виртуальный речной порт, оборудованный причалом, рейдом и береговыми сооружениями для приема судовых отходов с судов-сборщиков. Через порт проходит поток транзитных судов различных типов, часть из которых подает заявки на обслуживание. Поскольку твердые бытовые отходы, образующиеся на судах, имеют относительно небольшую массу и занимают небольшой объем по сравнению с нефтесодержащими и сточными водами (НВ и СВ), они не рассматривались в качестве сдаваемых отходов. Количество и тип судов, подающих заявки на сдачу в порту СВ и НВ, носят случайный характер, зависящий от общей интенсивности судоходства. Работа судна-сборщика описывается с помощью имитационной модели, которая учитывает все его технологические операции, связанные со сбором и транспортировкой отходов. Такой подход позволяет смоделировать работу системы и рассмотреть параметры и возможности оптимизации основного ее элемента – судна-сборщика [1, 2].

При неоптимальном подборе характеристик судна-сборщика транспортные суда могут столкнуться с одной из проблем – нехваткой судов-сборщиков или их грузоподъемности для принятия накопившихся отходов. В связи с этим увеличивается время, проведенное судном в порту вследствие очереди на сдачу отходов, что негативно

отражается не только на пропускной способности конкретного порта, но и на всем участке речного пути. В связи с этим необходимо оптимизировать характеристики судна-сборщика в зависимости от интенсивности судоходства и месторасположения приемных сооружений на внутренних водных путях [2].

На начальных этапах исследований рассматривались следующие параметры, которые могут влиять на эффективность работы системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика:

- поток судов, т.е. среднее количество судов, проходящих через границы порта в течение суток;
- ЭХВП (экологическая характеристика водного пути), равная минимально допустимой автономности плавания судна, определяемая количеством и дислокацией приемных устройств в районе предполагаемой эксплуатации судна;
- расстояния от причала и рейда до места базирования судна-сборщика;
- количество судов-сборщиков и их характеристики: вместимость сборных цистерн СВ и НВ, средняя скорость движения, производительность насосов для перекачки СВ и НВ.

Параметр «поток судов» является ключевым параметром и состоит из двух частей. Первая часть составляет величину (значение) потока судов на данном участке речного пути. Например, 25 судов в сутки. Вторая часть – это сопоставление каждому судну, проходящему мимо порта, его типа и характеристик из базы данных, основанной на сведениях из регистрационной книги Российского классификационного общества. Для составления базы данных были отобраны проекты пассажирских и грузовых судов с необходимыми для моделирования известными характеристиками. При этом были отсеяны маломерные, обстановочные и пр. суда, вклад которых в общее количество судовых отходов незначителен. Важно отметить, что параметр «поток судов» описывается распределением Пуассона [1, 2, 3, 4]

При численном моделировании системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика параметр «поток судов» определялся исходя из того, сколько судов может обслужить судно-сборщик при заданных исходных данных. Остальные отобранные параметры варьировались в определенном диапазоне, в пяти вариантах. Для опорных значений характеристик судна-сборщика в качестве прототипа был выбран проект 354К, который активно эксплуатируется на территории страны. В результате моделирования было установлено, что соотношение количества сдаваемых в рассматриваемом речном порту СВ к НВ составляет примерно 5:1 [2].

Для установления степени влияния отобранных параметров на работу системы предварительно был проведен анализ их значимости. Скорость и расстояния не оказали значимого воздействия на работу системы, поэтому были оптимизированы объемы цистерн и производительность насосов, установленных на борту судна-сборщика. В ходе дальнейших исследований в качестве ключевых параметров были выбраны поток судов, ЭХВП, вместимость сборных цистерн и производительность насосов судна-сборщика [2, 5].

Таким образом, для оптимизации работы системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика были выбраны два параметра судна-сборщика – «объем цистерн СВ» (V_{CB}) и «производительность насоса СВ» (q_{CB}), которые могут оказывать влияние на проектирование и стоимость судна экологического назначения. При этом, как было выявлено ранее $V_{HB} = V_{CB} / 5$, $q_{HB} = q_{CB} / 5$. Кроме того, значения остальных параметров системы составляли: «ЭХВП» = 1 сут, «расстояние от причала до места базирования судна-сборщика» = 3000 м, «расстояние от рейда до места базирования судна-сборщика» = 6000 м, «скорость судна-сборщика» = 10 км/ч.

При оптимизации данной системы также важно минимизировать время, которое проведет транспортное судно в порту при сдаче накопившихся отходов. В связи с этим

третьим критерием выступает «время, проведенное судном в порту». Под этой величиной понимается промежуток времени с момента захода транспортного судна в порт и выхода из него, что также является статистической величиной, характеризующей среднее время. Причем, данному критерию присваивается высокая степень важности по сравнению с двумя другими перечисленными критериями. Поскольку при сокращении времени, проведенного транспортным судном в порту, возрастает пропускная способность не только самого порта, но и водного пути в целом. Следует отметить, что данный параметр напрямую зависит от других ключевых параметров оптимизации – «объем цистерн СВ» и «производительность насоса СВ». И соответственно – чем выше производительность насосов и больше объем цистерн, тем быстрее транспортное судно будет обслужено в порту. При этом существуют ограничения по объему и производительности, связанные, прежде всего, с проектированием судна экологического назначения, а также экономическими показателями [2].

В нашем случае, при многокритериальной оптимизации, в качестве целевой функции была выбрана мультипликативная функция скаляризации. Ее преимущество заключается в том, что она не зависит от размерности используемых величин [6]. Степень значимости задавалась следующим образом: критерию «время, проведенное судном в порту» составляла 1/2, «объем цистерн СВ» и «производительность насоса СВ» – составляет 1/4. В связи с этим целевая функция при оптимизации работы системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика выглядит следующим образом:

$$F(V_{CB}, q_{CB}) = t^{1/2}(V_{CB}, q_{CB}) \cdot V_{CB}^{1/4} \cdot q_{CB}^{1/4} \quad (1)$$

где t – среднее время, проведенное транспортным судном в порту,

V_{CB} – объем цистерн СВ,

q_{CB} – производительность насосов по СВ.

Целью многокритериальной оптимизации системы сбора судовых отходов посредством судна-сборщика было нахождение минимума целевой функции.

На рис. 1 показан пример целевой функции для потока судов, проходящих мимо рассматриваемого речного порта, величина которого равна 5 судов в сутки.

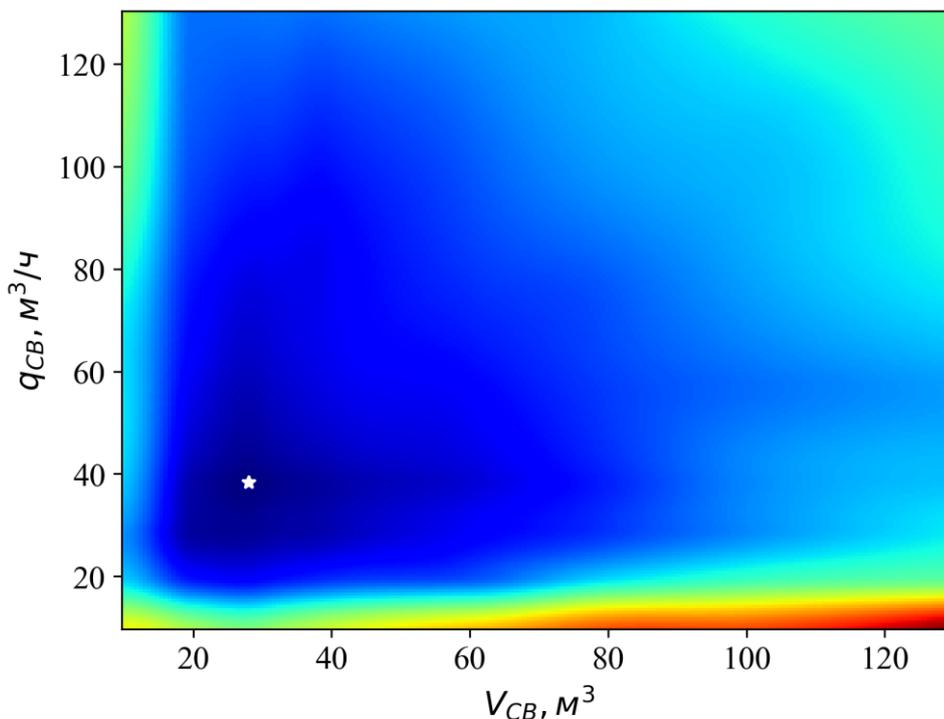


Рис.1. Пример расчета целевой функции при потоке судов, проходящих мимо порта, равном 5 судам в сутки

На рис. 1 по горизонтальной оси отложен объем цистерн СВ, по вертикальной – производительность насосов СВ. Цвет показывает логарифм значения целевой функции, который позволяет продемонстрировать изменчивость целевой функции. Красный цвет отвечает большему значению целевой функции, а синий – меньшему. Белый символ (звезда) отвечает оптимальному, т.е. минимальному значению целевой функции при многокритериальной оптимизации.

На рис. 2 представлен результат оптимизации работы системы сбора судовых отходов в речном порту с помощью судна-сборщика при потоке судов равном 5, 10, 15, 20, 25 судов в сутки.

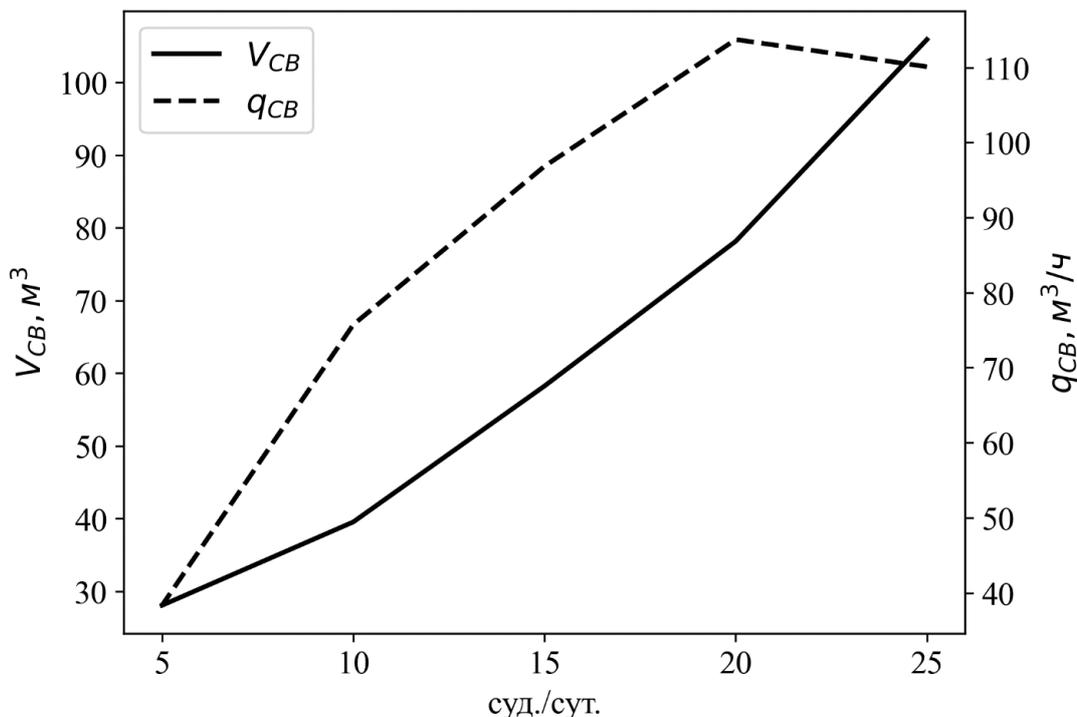


Рис.2. Результат оптимизации работы системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика при потоке судов равном 5, 10, 15, 20, 25 судов в сутки

На рис. 2 по горизонтальной оси отложен поток судов, проходящих по реке мимо порта, по вертикальной – объем цистерн СВ и производительность насосов СВ, установленных на борту судна-сборщика. Соответствующая величина отображена своей линией. Ее тип указан в легенде сверху слева.

В результате можно сделать вывод о том, что чем выше значение параметра системы «поток судов», тем больше становятся значения оптимизируемых параметров системы сбора судовых отходов в речном порту с помощью судна-сборщика – «объем цистерн СВ» и «производительность насоса СВ».

На основании данных, полученных при численном моделировании, была составлена сводная таблица по основным результатам оптимизации, которые представлены в таблице 1.

Сводная таблица результатов численного моделирования системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика

	ЭХВП, сут					«Объем цистерн СВ», м ³	«Производительность насоса СВ», м ³ /час	«Время, проведенное судном в порту», час	Загруженность системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика, %
	0.2	0.5	1	2	3				
Поток судов, суд/сут	23	9	5	3	3	28	38	2.8	27
	46	19	10	7	6	40	76	2.5	37
	69	28	15	10	9	58	97	2.6	47
	92	37	20	13	12	78	114	2.9	56
	115	46	25	16	15	106	110	3.7	67

В результате можно сказать о том, что при увеличении потока судов, проходящих мимо порта, в 5 раз загруженность системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика увеличивается в 2,48 раза. Но при этом такой же большой скачок наблюдается и в увеличении значений параметров судна-сборщика «объем цистерн СВ» и «производительность насоса СВ» в 3,79 и 2,89 раз соответственно.

При рассмотренных вариантах ЭХВП одинаковые оптимальные параметры судна-сборщика соответствуют разной интенсивности судоходства.

Таким образом, предлагаемое моделирование работы системы сбора судовых отходов с помощью судна-сборщика позволяет решить задачу соответствия характеристик судна-сборщика интенсивности судоходства на данном участке водного пути и ЭХВП. К тому же данный подход дает возможность оптимизировать и сократить время, проведенное транспортным судном в речном порту. Что может привести к увеличению пропускной способности порта и речного пути в целом. Следует отметить, что найденные оптимальные параметры судна-сборщика являются экономически эффективными. Предлагается использовать судно с минимизированными значениями объемов цистерн и производительности насосов.

Согласно разработанному алгоритму, были получены значения оптимальные трех значимых критериев при разном потоке судов и значении ЭХВП. Данный оптимальный результат применим к рассматриваемым граничным условиям и сопоставим с реальными данными и прототипом судна-сборщика 354К.

В результате предлагаемое численное моделирование дает возможность нахождения оптимальных вариантов характеристик судна-сборщика в системе внесудовой очистки в зависимости от интенсивности судоходства и ЭХВП. Что позволяет решить одну из задач в «Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» в части обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях, включая экологическую безопасность.

Список литературы:

1. Васькин, С. В., Дмитриева, М. С. Моделирование нагрузки на внесудовые водоохранные средства // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – №. 3 (79). – С. 38-46.
2. Манакова, М. С., Васькин, С. В. Оптимизация характеристик теплохода – сборщика отходов в системе внесудовой очистки в зависимости от интенсивности движения флота // Речной транспорт (XXI век). – 2024. – №. 3. – С. 55-58.

3. Регистровая книга Российского Классификационного Общества. Режим доступа:

<https://rfclass.ru/activities/class/regbook/>

4. Лифшиц, А. Л., Мальц, Э. А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания //Сов. радио. – 1978. – 247с.

5. Манакова, М. С., Васькин, С. В. Влияние скорости судна-сборщика на эффективность работы системы сбора судовых отходов //Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – №. 78. – С. 76-83.

6. Балясников, В. В. и др. Многокритериальная оптимизация транспортных систем массового обслуживания/ Балясников, В. В., Богданов, А. А., Маслаков, В. П., Староселец, В. Г. //Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2012. – №. 6 (43). – С. 73-76

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE COLLECTING VESSEL IN THE OFF-SHIP CLEANING SYSTEM DEPENDING ON THE INTENSITY OF SHIPPING TRAFFIC

Margarita S. Manakova, Sergey V. Vas'kin,

Abstract. Multicriteria optimization of the system of ship-generated waste collection in a river port by means of a collection vessel is considered. As a result of numerical modeling the optimal values of the characteristics of the collection vessel were obtained depending on the intensity of navigation and the location of reception facilities on inland waterways.

Keywords: off-ship cleaning, ship waste, environmental safety, collector vessel, optimization.