

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ПОРТА МЕТОДАМИ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Л. Кузнецов, А.Д. Семенов (Санкт-Петербург)

Введение. Технологическое проектирование морских портов жестко регламентируется документами, необходимость использования которых диктуется условиями прохождения государственных экспертиз [1, 2]. В то же время зарубежный опыт рекомендует не вводить в этот творческий процесс каких-либо ограничений и рамок, не связанных напрямую с безопасностью эксплуатации [3]. Противоречие между устаревшими нормами, исполнение которых предписывается руководящими документами [4–7], и требованиями современной практики ведения международного транспортного бизнеса, обсуждается уже давно. Эффективность и полезность использования современных методов математики и средств вычислительной техники в технологическом проектировании является предметом многих научных исследований [8, 9].

В простейшем случае порт или терминал, имеющий несколько причалов, может быть представлен системой массового обслуживания, в которой роль каналов обслуживания выполняют отдельные причалы, а в качестве потока заявок на обслуживание – заходящие в порт суда. Судно, зашедшее в порт, становится под обработку к свободному причалу. Если все причалы оказываются занятыми, судно становится в очередь в акватории порта (внутреннем рейде) и ожидает освобождения причала (рис. 1).

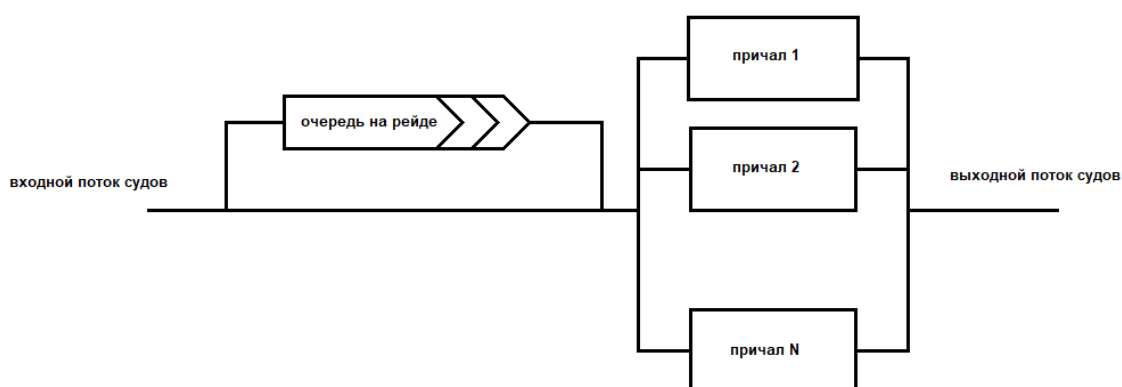


Рис. 1. Терминал как система массового обслуживания

Каждый канал обслуживания характеризуется временем обработки заявок, которым в рассматриваемом случае служит время выполнения погрузо-разгрузочных операций T_{op} . В свою очередь, это время определяется объемом выгружаемой и погружаемой грузовых партий (V_{imp} и V_{exp}), и производительностью причала P_{berth} , т.е. $T_{op} = \frac{V_{imp} + V_{exp}}{P_{berth}}$.

Отношение среднего времени, которое судно проводит в очереди на обслуживание T_{que} , ко времени погрузо-разгрузочных операций T_{op} , носит название относительного ожидания $T_{wait} = \frac{T_{que}}{T_{op}}$. Если, например, судно находится в очереди 12 ч, и обслуживается у причала (разгружается и грузится) в течение 24 ч, значение относительного ожидания есть безразмерная величина 0,5.

Мощностью пропускной системы P_{sys} называется интенсивность выходного потока (количество судов в достаточно длинный интервал времени), которая обеспечивается непрерывной работой всех каналов обслуживания. При случайном входном потоке такой режим работы системы может обеспечиваться лишь за счет образования очереди. Если задается некоторое ограничение на очередь заявок, то интенсивность выходного потока снижается. Например, может быть задано максимальное время пребывания заявок в системе, ограничено относительное ожидание, установлена предельная длина очереди, потребовано полное ее отсутствие. Интенсивность потока заявок, наблюдаемая при соблюдении тех или иных указанных условий, называется пропускной способностью этой системы P_{cap} . В случае соблюдения определенных требований к случайному входному потоку и временам обработки заявок каналами обслуживания, характеристики системы (мощность, пропускная способность, длины очередей, времена пребывания заявок в системе) могут быть получены с помощью аналитических зависимостей, получаемых теорией массового обслуживания. В произвольном случае эти характеристики могут быть определены путем имитационного моделирования. Пример результатов подобного моделирования появления очереди на внутреннем рейде для потока судов разного типа приведен на рис. 2.

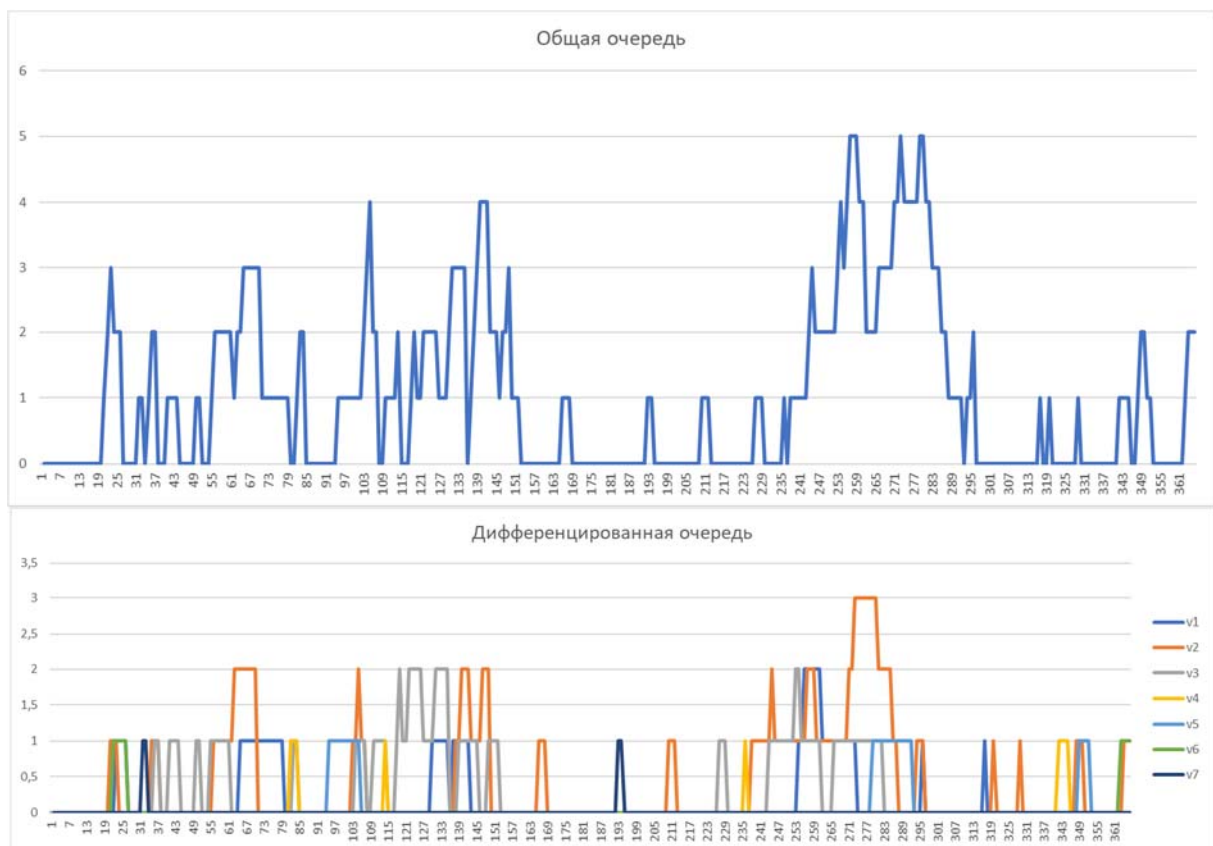


Рис. 2. Пример результатов моделирования обслуживания судов группой причалов

Материалы и методы. В реальных случаях представление морского порта или терминала канонической системой массового обслуживания оказывается слишком большим упрощением. Так, во многих случаях еще одной связанной и взаимодействующей системой массового обслуживания служит судоходный канал, ограниченный по интенсивности пропуска судов или характеризуемый режимом его работы

(разрешающий или запрещающий движение в нем судов в определенные моменты). Поток судов на входе в такой канал будет либо допускаться к его прохождению, либо суда будут становиться в очередь на внешнем рейде и ожидать момента освобождения канала (рис. 3).

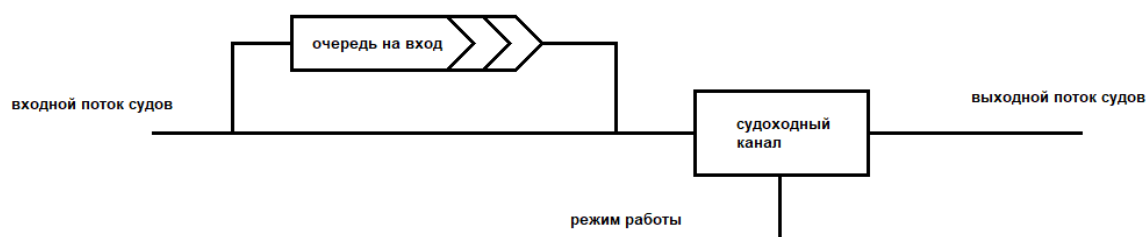


Рис. 3. Судоходный канал как система массового обслуживания

Таким образом, поток судов на выходе из канала будет испытывать некоторую временную модуляцию: например, равномерный случайный поток будет формироваться в «пачки», соответствующие интервалам разрешения движения, или же «пачки» входного потока будут «размазываться» за счет ограничения интенсивности пропуска судов через канал. В любом случае, выходной поток может больше или меньше отличаться от входного потока судоходного канала. Условно это показано на рис. 4, где красные участки обозначают запрет на движение в канале, а зеленые – разрешение на движение.

Момент времени	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Разрешено/запрещено	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Судно в канале	0	0	0	0	0	0	v1	v1	v2	v2	v1	v1	v2	v6	v2	v4	v5	v3	v2	v4	0	0	0	0	0	0	v2	v1	v4	v1

Рис. 4. Иллюстрация модуляции потока судов судоходным каналом

Пример моделирования с целью анализа образования очереди различных типов судов на внешнем рейде в ожидании освобождения канала при 50% доле его работы на пропуск судов показан на рис. 5.

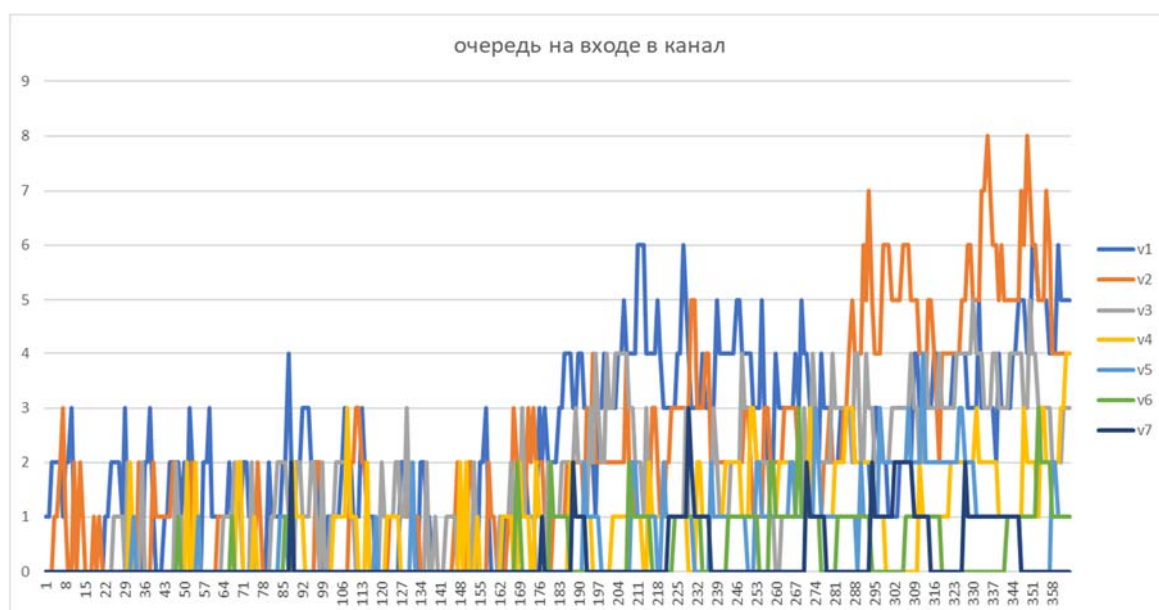


Рис. 5. Образование очереди судов на входе в канал

Рассмотрим теперь случай, когда на вход ведущего в порт судоходного канала поступает поток судов произвольной природы, которые должны быть обслужены причалами порта. В этом случае причиной постановки судна в очередь на внешнем рейде может служить как занятость судоходного канала, так и переполнение внутреннего рейда, вызванное занятостью причалов порта грузовыми операциями.

Судно может покинуть очередь и войти в судоходный канал также лишь при соблюдении двух условий: наличия места на внутреннем рейде и разрешения движения по каналу (рис. 6).

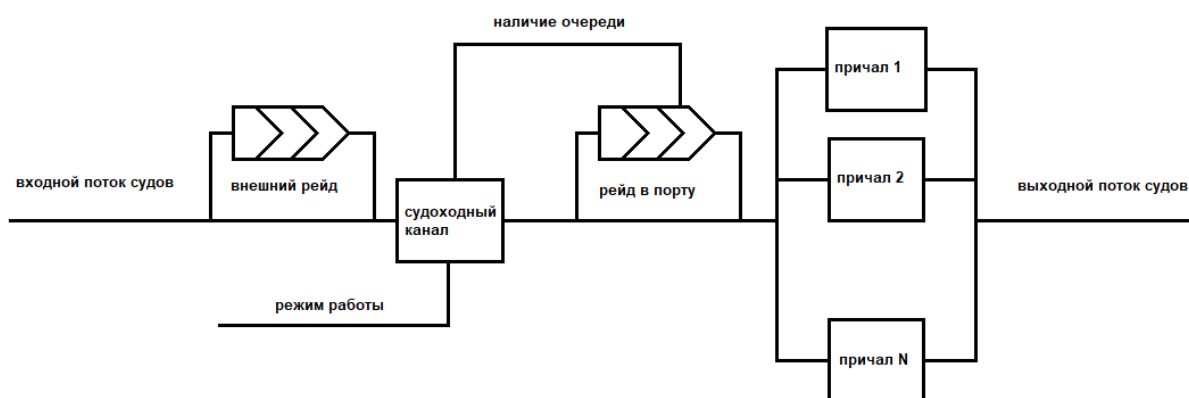


Рис. 6. Взаимодействие входного судоходного канала и причалов порта

Подобная взаимосвязь в теории моделирования носит название ансамбля взаимодействующих систем, поскольку обе компоненты оказывают влияние на режимы работы друг друга.

Более сложный случай возникает тогда, когда обслуженные у причалов суда покидают порт через выходной канал, который также имеет свою пропускную способность и режимы работы (рис. 7).

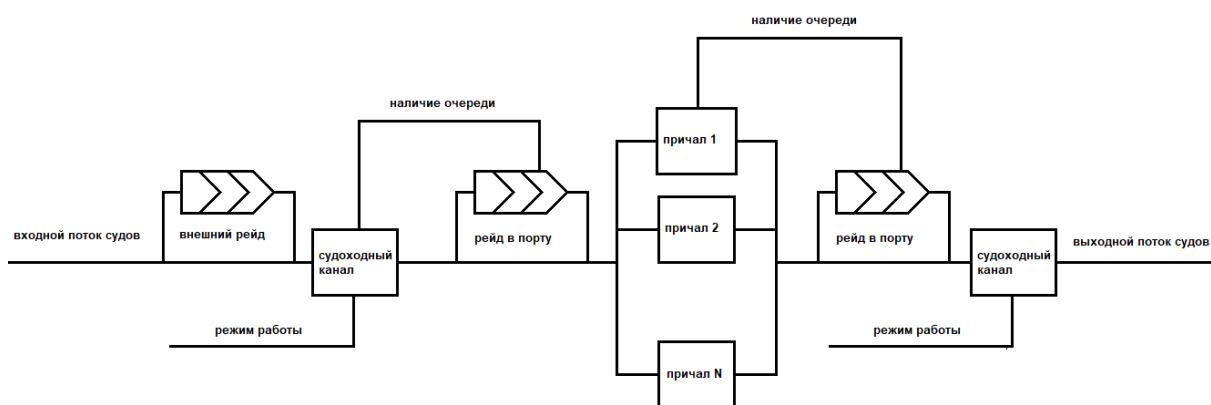
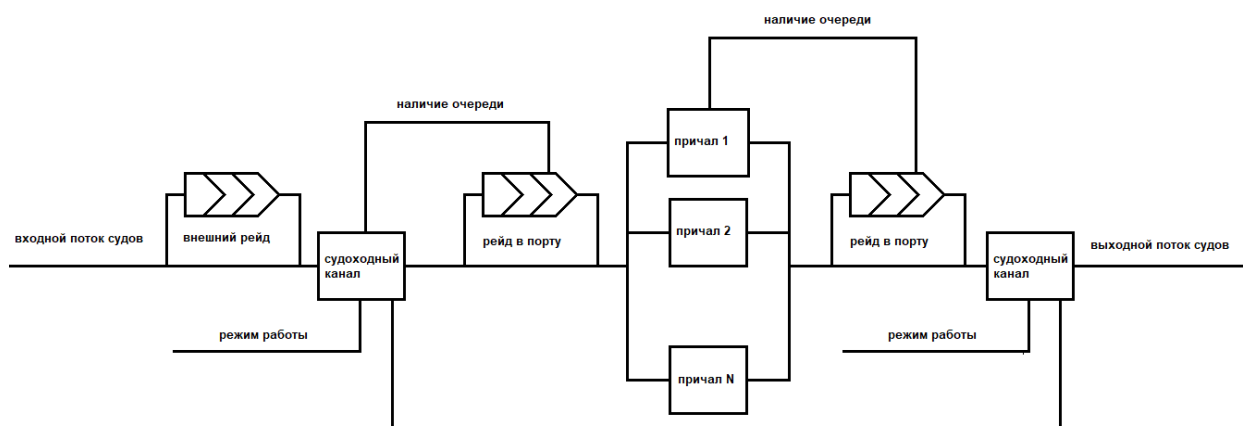


Рис. 7. Взаимодействие подходов каналов и терминала

В этом случае переполнение внутреннего рейда, на котором суда ожидают выхода из акватории порта, может вызвать невозможность освобождения причалов. В свою очередь, эта занятость причалов может переполнить внутренний рейд для судов, прошедших канал и ожидающих освобождения причалов для постановки под обработку. Наконец, в самом неблагоприятном случае это может привести к невозможности входа в канал и переполнения внешнего рейда.

Ансамбль взаимодействующих систем в данном случае получает несколько контуров обратной связи. Еще сложнее это взаимодействие становится тогда, когда рейд в порту разделяется как судами, прошедшими канал и ожидающими обработки, так и обработанными судами, ожидающими выхода из порта. Наконец, входной и выходной судоходный каналы могут быть объединены в один общий канал, работающий по независимому расписанию и/или учитывающим образовавшиеся очереди на внутренних и внешних рейдах.



Терминал с подходным судоходным каналом без внутреннего рейда.

Если акватория порта ограничена, то внутренних рейдов (между входным каналом и причалами, и между причалами и выходным каналом) может не быть (рис. 8).

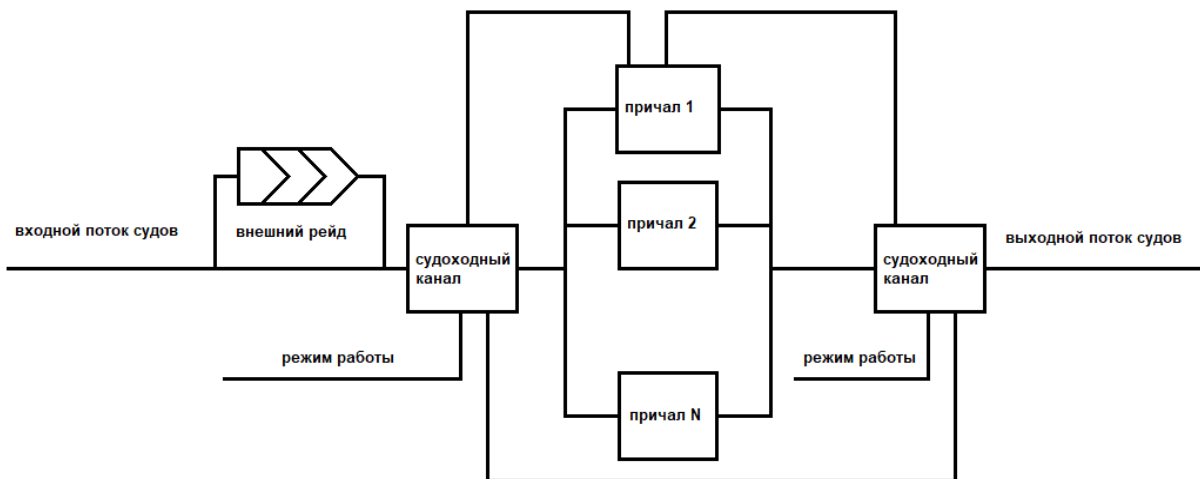


Рис. 8. Взаимодействие судоходного канала и причалов без внутреннего рейда

В этом случае занятость судоходного канала для работы на выход из порта не позволяет обработанным судам не только покинуть порт, но и освободить причал. В свою очередь, невозможность освободить причалы может не допустить вхождения в канал судов, ожидающих на внешнем рейде обслуживания. Хотя структура обратных связей для этого случая представляется более простой, чем показанная на рис. 4, отсутствие «буферов» в виде очередей на внутреннем рейде может оказывать более сильное влияние на характеристики обработки входного потока (понимаемой как его преобразование в поток выходной).

Результаты. Для решения описанных выше проблем была разработана комплексная имитационная модель, включающая в свою логическую структуру несколько компонент, связанных между собой прямыми и обратными связями. В отношении захода на первый терминал маршрута потоки судов являются независимыми, и их обработка может быть представлена двумя отдельными системами массового обслуживания, соответствующими каждому терминалу. Поскольку в канале суда могут двигаться непосредственно друг за другом, подчиняясь одному и тому же режиму работы, эти каналы при моделировании для простоты могут рассматриваться как отдельные и самостоятельные (рис. 10).

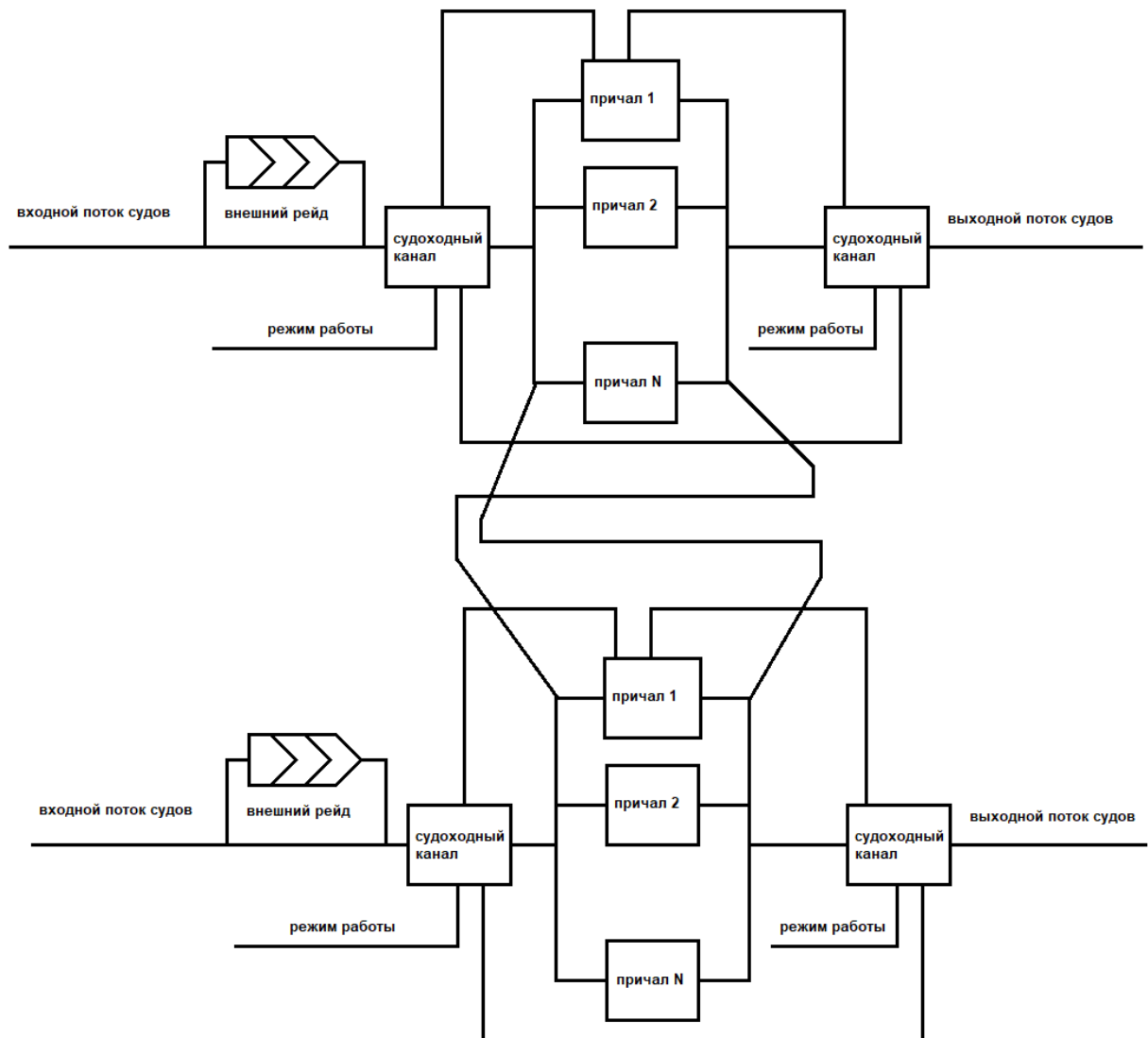


Рис. 9. Модель взаимодействующих терминалов

Очереди на внешнем рейде для обоих терминалов образуются как одновременно, при запрете движения по каналу, так и отдельно – при занятости причалов соответствующего терминала.

Суда, обработанные у терминала и следующие ко второму терминалу порта, ждут освобождения причалов последнего, продолжая занимать причал первого терминала. При освобождении причала терминала назначения они имеют приоритет перед судами, ожидающими входа в канал на рейде.

Прохождение канала судном занимает некоторое время (около 3 ч). При этом причал, к которому будет поставлено идущее по каналу судно, считается занятым. Как следствие, судно в модели может быть мгновенно поставлено к причалу, но его обработка будет начата с задержкой, равной времени прохождения по каналу.

Заключение

Для установления адекватности модели после ее валидации была проведена калибровка с учетом реальных данных, которые отражают работу нескольких взаимодействующих контейнерных терминалов Большого порта Санкт-Петербург. Результаты вычислительных экспериментов с моделью показали достаточно близкое совпадение временных параметров моделирования с реальными данными. После установления адекватности модели с ее помощью были выполнены расчеты для оптимизации схемы заходов на терминалы и расписания движения судов на подходе к порту и в подходном канале.

Полученные результаты подтверждают эффективность выбранного подхода и позволяют считать созданный модели вполне заслуживающим включения в инструментарий современного технологического проектирования.

Литература

1. Нормы технологического проектирования морских портов, утв. 19.10.1957 / Министерство морского флота СССР. Государственный институт по проектированию морских портов и судоремонтных предприятий «Союзморниипроект». 1957. 37 с.
2. Нормы технологического проектирования морских портов, утв. 15.09.1967 / Государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт морского транспорта «Союзморниипроект». 1967. 184 с.
3. **Stopford M.** Maritime Economics. 3rd Edition / M. Stopford // Taylor & Francis Group. 2009. Pp. 840.
4. ВНТП 01-78 Нормы технологического проектирования морских портов, утв. 30.12.1977 и 25.10.1978. Министерство морского флота, «Союзморниипроект». Москва: ЦРИА «Морфолт», 1980. 122 с.
5. РД 31.3.05-97 Нормы технологического проектирования морских портов, утв. 21.05.1997. Министерство транспорта РФ, «Союзморниипроект». 1998. 177 с.
6. РД 31.3.01.01-93 Руководство по технологическому проектированию морских портов, утв. 15.11.1993. Департамент морского транспорта Минтранса, «Союзморниипроект». 1993. 276 с.
7. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов, утв. 01.03.2018. Министерство транспорта РФ, ОАО «Союзморниипроект», ЗАО «ЦНИИМФ». 2018. 226 с.
8. **Dally H.K.** Container handling and transport A manual of current practice / H.K Dally, F.J. Maquire // Container Handling and Transport. CS Publication Ltd. 1983.
9. **Кузнецов А.Л.** Морские контейнерные перевозки / А.Л. Кузнецов, А.В. Кириченко, О.В. Соляков, А.Д. Семенов. М.: Моркнига. 2019. 413 с.