

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371

## EVALUATING THE METACENTRIC HEIGHT OF CONTAINER SHIP INFLUENCE ON GENERATION OF CONDITIONS CONTRIBUTING TO THE OCCURRENCE OF PARAMETRIC ROLLING RESONANCE

**R. S. Tsarik**

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation

*The influence of the container ship metacentric height on forming of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance is considered. It is noted that in the theory of ship rolling and existing methods of forecasting and taking into account parametric rolling resonance of container ships, the influence of the actual height of the centers of gravity of containers on the metacentric height, and, accordingly, on the parameters of ship rolling, is not considered. In the actual conditions of the ship operation, the rolling parameters are determined in fact, using a stopwatch and eye-measuring. The increase in accidents with the loss of containers overboard, gives every reason to consider that already at the planning stage of the ship voyage, it is critically important to know its actual metacentric height and how it will affect the rolling parameters in the expected hydrometeorological conditions. The purpose of this study is a comparative evaluation of the influence of the metacentric height of a container ship on the forming of conditions that contribute to the occurrence of a parametric rolling resonance. For this purpose, two specific conditions for the occurrence of parametric rolling, in accordance with the provisions of the circular letter of the International Maritime Organization, aimed at ensuring the safety of ships navigation in adverse weather and sea conditions are considered in the paper. The change in the actual metacentric height of the container ship is estimated taking into account the possible values of the actual height of the centers of gravity of the containers. As a result, it is confirmed that the change in the metacentric height of the container ship affects the conditions for the occurrence of parametric rolling. This is expressed in changing in the period of rolling, which depends on the metacentric height, and the period of the waves encounter, which depends, among other things, on the course and speed of the ship. It is concluded that it is necessary to take into account the actual metacentric height of the container to assess the safety of navigation in the expected hydrometeorological conditions of the voyage. It is shown how the combined change in the metacentric height, ship course and speed affects the occurrence of parametric rolling of the container ship.*

*Keywords: container ship, container, center of gravity, stability, metacentric height, parametric resonance, rolling.*

**For citation:**

Tsarik, Ruslan Stanislavovich. "Evaluating the metacentric height of container ship influence on generation of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 359–371. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.

**УДК 656.61.052**

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ БОРТОВОЙ КАЧКИ

**Р. С. Царик**

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского», Владивосток, Российская Федерация

*Рассмотрено влияние метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Отмечается, что в теории качки судна и существующих методах прогнозирования и учета параметрического резонанса контейнеровозов не рассматривается влияние фактической аппликаты центров тяжести контейнеров на метацентрическую высоту, а, соответственно, и на параметры качки судна. В реальных условиях плавания судна*

параметры качки определяются фактически, с использованием секундомера, и глазомерно. Рост аварийности с потерей контейнеров за борт позволяет считать, что уже на стадии планирования рейса судна критически важно знать его фактическую метацентрическую высоту  $u_{\text{факт}}$ , какое влияние она будет оказывать на параметры качки в ожидаемых гидрометеорологических условиях. Целью данного исследования является сравнительная оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Для этого в работе рассмотрены два характерных условия возникновения параметрической бортовой качки в соответствии с положениями циркулярного письма Международной морской организации, направленного на обеспечение безопасности плавания судов в неблагоприятных погодных условиях и состоянии моря. Изменение фактической метацентрической высоты контейнеровоза оценивалось с учетом возможных значений фактической аппликаты центров тяжести контейнеров. В результате было подтверждено, что изменение метацентрической высоты контейнеровоза оказывает влияние на условия возникновения параметрической бортовой качки. Это выражается в изменении периода бортовой качки, зависящего от метацентрической высоты, и периода набегания волн на судно, зависящего в том числе от курса и скорости судна. Сделан вывод о том, что необходимо учитывать фактическую метацентрическую высоту контейнеровоза для оценки безопасности плавания в ожидаемых гидрометеорологических условиях рейса. Показано, как совокупное изменение метацентрической высоты, курса и скорости судна влияет на возникновение параметрической бортовой качки контейнеровоза.

*Ключевые слова:* контейнеровоз, контейнер, центр тяжести, остойчивость, метацентрическая высота, параметрический резонанс, бортовая качка.

**Для цитирования:**

Царик Р. С. Оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 359–371. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.

## Введение (Introduction)

Поперечно симметричное судно, двигаясь на идеальном встречном или попутном волнении с большой длиной волны, будет испытывать килевую качку, подъем и скольжение на волне, не испытывая при этом в большинстве случаев бортовой качки. Однако даже в таких условиях при определенной частоте набегания волн может возникнуть также бортовая качка, которая начавшись, может вырасти до большой амплитуды, ограниченной демпфированием крена, и в экстремальных условиях подвергнуть судно, груз и экипаж большой опасности. В теории колебаний это явление называется *параметрически возбужденными колебаниями*, или упрощенно — *параметрическими колебаниями*. Применительно к судовождению данное явление называется *параметрической качкой*, или *параметрическим резонансом*. Термин описывает состояние движения, возникающего не в результате прямого воздействия изменяющейся во времени внешней силы или момента, а в результате периодического изменения определенных внутренних параметров колебательной системы.

Параметрическая бортовая качка представляет собой очень серьезную опасность для судна. Вероятность переворачивания крупнотоннажного контейнеровоза очень мала, однако потеря палубных контейнеров и повреждение конструкций судна являются вполне типичным результатом параметрического резонанса. В таких условиях значительно ухудшается обитаемость судна, самочувствие членов экипажа и способность ими исполнять свои служебные обязанности, в том числе обеспечивать безопасность.

Впервые на параметрический резонанс начали обращать пристальное внимание в 1950-х гг., во время расследования аварий с небольшими, в основном рыболовными судами, акцентируя внимание на опасности плавания на попутном волнении и недостаточной остойчивости. Первоначально считалось, что именно небольшие суда с недостаточной остойчивостью могут подвергнуться параметрическому резонансу. Однако с развитием трансокеанских контейнерных перевозок и ростом контейнеровместимости судов начали отмечать возникновение параметрического резонанса также и у крупнотоннажных контейнеровозов. Так, в октябре 1998 г. контейнеровоз APL China попал в штормовые условия в Тихом океане, испытав параметрическую бортовую качку. В результате

более 60 % контейнеров были потеряны за борт или получили повреждения. Этот случай явился одним из первых официально признанных примеров параметрического резонанса с крупнотоннажным контейнеровозом. В январе 2003 г. контейнеровоз Maersk Carolina, следуя в штормовых условиях в Атлантическом океане, испытал крен до 47°. Чрезвычайно интенсивная бортовая качка продолжалась в течение нескольких минут. В результате 133 контейнера были потеряны и более 50 — повреждены. Иски за потерю груза превысили 4 млн долл. В течение первых двух месяцев 2021 г. произошло четыре серьезные аварии в штормовых условиях с потерей контейнеров за борт, общее количество которых составило более 1100 единиц.

Проблеме параметрического резонанса посвящено большое количество работ как иностранных, так и отечественных исследователей. Некоторые из них рассматривают этот вопрос относительно к типам судов, другие — фокусируют внимание именно на контейнеровозах как на одном из наиболее подверженных параметрическому резонансу типов судов. В работе [1] автором выполнено исследование теоретических методов и их численных решений для прогнозирования параметрической качки судна. Проведенные эксперименты включали встречное и попутное волнение для двух состояний загрузки. Был сделан вывод о том, что явление параметрического резонанса неоднозначно для регулярного и нерегулярного волнения.

Эксперименты, направленные на изучение связи между значениями метацентрической высоты и углами крена судна на волнении, выполнены авторами в работе [2]. В результате установлено, что снижение скорости судна относительно неблагоприятного значения всегда приводит к уменьшению бортовой качки. Увеличение скорости судна не дает такого однозначного результата и при этом отмечается, что на параметры бортовой качки большее влияние оказывает ускорение судна, чем непосредственно увеличенная скорость.

В работе [3] автором выполнено исследование влияния различных параметров на возникновение и интенсивность параметрического резонанса, а также предложена концепция судовой системы оперативного выявления условий, при которых судно может подвергнуться параметрической бортовой качке. Несмотря на то, что эксперименты проводились с использованием моделей рыболовных траулеров, автором сделано заключение о том, что полученные результаты могут быть применены и к другим типам судов, в частности, к контейнеровозам.

Условия возникновения параметрического резонанса у крупнотоннажных контейнеровозов при встречном волнении были исследованы группой ученых в работе [4]. В результате было подтверждено, что параметрическая качка вызывает значительные дополнительные нагрузки на палубные контейнерные штабели, которые могут превышать значения, установленные правилами соответствующих классификационных обществ.

Способ использования диаграммы Ю. В. Ремеза для отображения возможности возникновения параметрического резонанса при определенных курсовых углах волн и заданной скорости движения судна предложен отечественными авторами в работе [5]. Проведенные эксперименты подтвердили, что для возникновения параметрического резонанса не обязательно следование судна в штормовых условиях. Авторы данного исследования пришли к выводу о том, что использование диаграммы является целесообразным для определения опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке и может повысить безопасность при плавании судна в шторм.

Интересным представляется исследование, выполненное отечественными учеными в работе [6]. Авторами была предложена расчетная программа на основе диаграмм Ю. В. Ремеза и А. И. Богданова, выполненная в программе Excel, позволяющая определять зоны резонанса бортовой, килевой и вертикальной качки, а также параметрического резонанса. Программа применима для условий глубокой и мелкой воды и учитывает индивидуальные характеристики судна.

В работе [7] отечественными учеными было исследовано возникновение параметрической бортовой качки с учетом влияния вертикальных колебаний судна. Авторами приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик параметрической бортовой качки для танкера и контейнеровоза при разных вариантах загрузки. В результате был сделан вывод о значительном влиянии аппликаты центра тяжести судна на резонансные амплитуды параметрической качки.

Каждое из приведенных ранее исследований подтверждает тот факт, что параметрическая бортовая качка представляет собой серьезную опасность для судна. При этом авторы предлагают различные подходы для определения условий возникновения параметрического резонанса, однако применительно к контейнеровозам вопрос учета фактической метацентрической высоты, зависящей от аппликаты центра тяжести контейнеров, не рассматривается.

Целью настоящего исследования является оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза, зависящей от аппликаты центра тяжести контейнера, на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Возникновение бортовой качки при плавании судна лагом к волне очевидно. Для судна, следующего на попутном или встречном волнении, колебание морской поверхности, сопровождающееся килевой и вертикальной качкой, приводит к изменению во времени геометрии подводной части корпуса, что, в свою очередь, обуславливает изменение во времени метацентрической высоты (МЦВ), т. е. способности судна противостоять внешним силам, пытающимся вывести его из состояния равновесия (накрентить). Пример изменения плеч восстанавливающего момента и МЦВ в виде диаграмм статической остойчивости (ДСО) в зависимости от положения судна на волне показан на рис. 1.

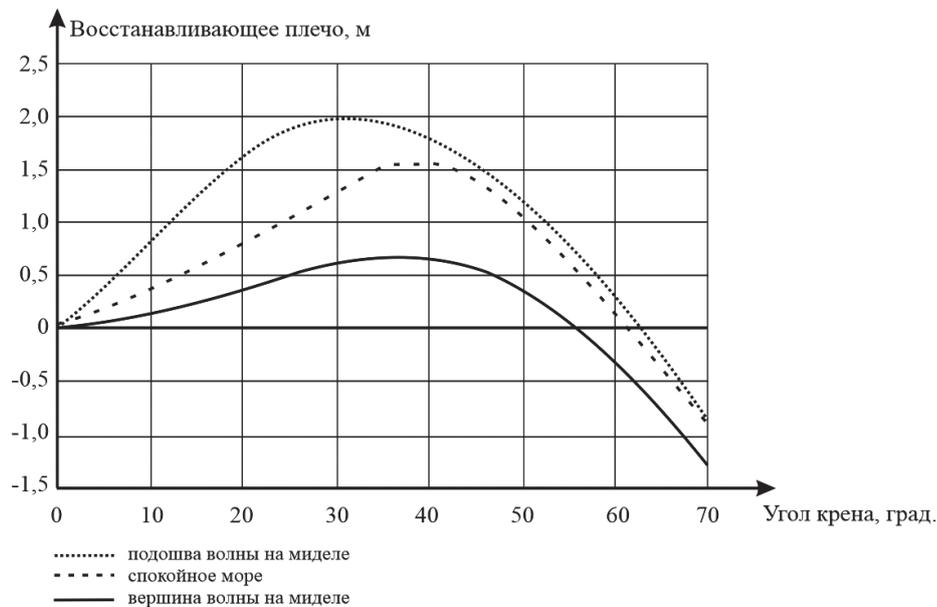


Рис. 1. Диаграммы статической остойчивости крупнотоннажного контейнеровоза при разном положении судна на волне

Графически причина такого изменения остойчивости от положения судна относительно профиля волны показана на рис. 2. Когда носовая и кормовая части судна находятся на гребнях последовательных волн, а средняя часть корпуса (мидель) — на подошве между ними, плоскость ватерлинии в среднем шире, чем при спокойной поверхности моря из-за расширяющейся формы корпуса в этих секциях, что приводит к увеличению МЦВ и восстанавливающих моментов. Когда гребень находится на миделе судна, средняя ширина плоскости ватерлинии, а, следовательно, МЦВ и восстанавливающие моменты, как правило, меньше, из-за сужения ватерлинии в носовой и кормовой частях судна, чем при спокойной поверхности моря.

В данной работе рассматривается плавание судна на регулярном волнении, без дополнительных динамических воздействий в виде ударов волн в корпус судна и шквалистых порывов ветра. Для оценки условий возникновения параметрической бортовой качки необходимо учитывать следующие факторы: размерные характеристики и скорость судна, МЦВ, длину и период волны, а также угол набегания волны на судно.

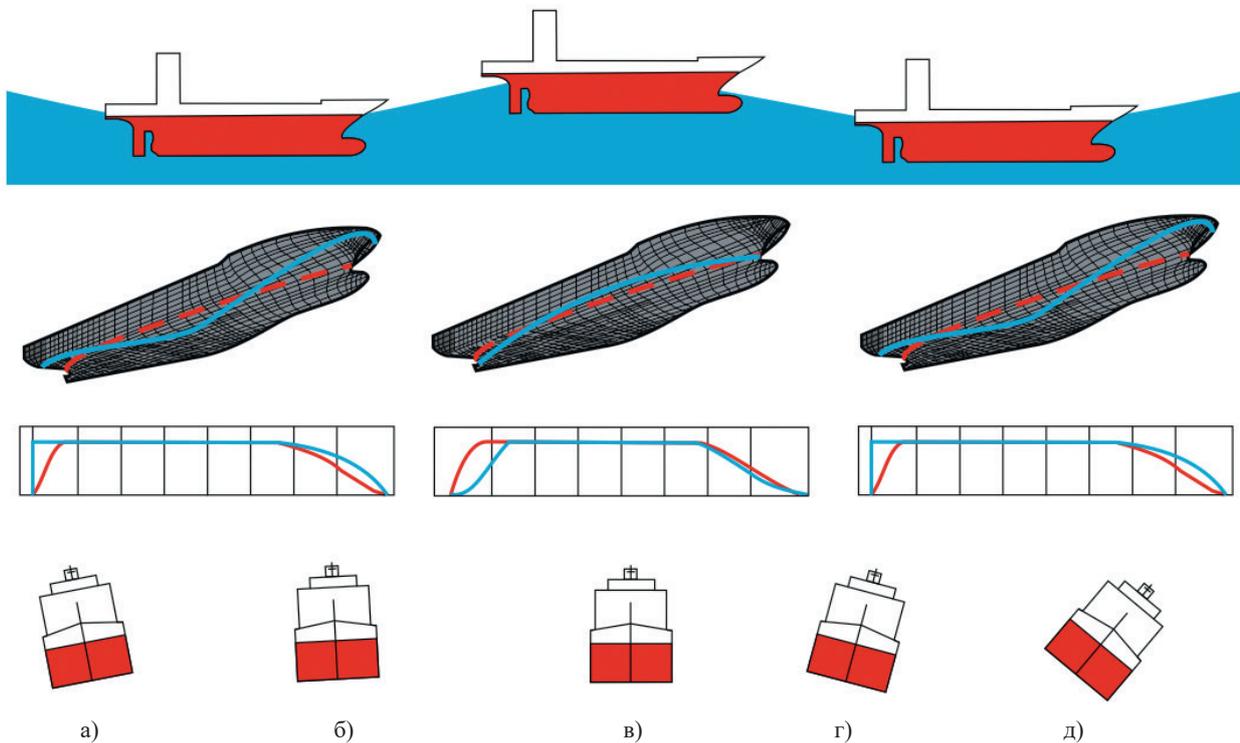


Рис. 2. Схема возникновения параметрической бортовой качки:

- a* — остойчивость увеличена, восстанавливающий момент большой;
  - б* — ускорение бортовой качки под воздействием сильного восстанавливающего момента;
  - в* — остойчивость снижена; *г* — судно продолжает крениться при сниженной остойчивости;
  - д* — остойчивость увеличена, большой восстанавливающий момент
- (далее переход в состояние *a*: цикл качки повторяется с увеличением угла крена)

Длина и ширина судна неизменны, параметры волнения также принимаются неизменными для рассматриваемых условий. Скорость и курс судна могут быть скорректированы в зависимости от текущих условий плавания для минимизации негативного воздействия волнения. При этом МЦВ, как отмечалось ранее, может изменяться в зависимости от положения судна на волне. Кроме того, фактическая МЦВ может значительно отличаться от расчетной из-за разницы между фактической аппликацией центра тяжести (ЦТ) судна и расчетной [8] и [9]. Таким образом, возникает задача определения фактических условий, способствующих возникновению параметрического резонанса, которые могут отличаться в результате использования разных исходных данных, а именно МЦВ, оказывая при этом значительное влияние на безопасность судна.

Одним из руководящих документов по предотвращению опасных ситуаций в неблагоприятных условиях погоды и волнения является циркулярное письмо ИМО<sup>1</sup>. Согласно этому документу, параметрический резонанс по бортовой качке наступает в следующих случаях:

1. Остойчивость изменяется с периодом столкновения с волной ( $T_E$ ), который примерно равен периоду бортовой качки судна ( $T_E = T_\theta$ ). Остойчивость достигает минимума один раз в течение каждого периода качки  $T_\theta$ . Из-за тенденции замедленного восстановления после накренения с большой амплитудой, период  $T_\theta$  может в определенной степени адаптироваться к периоду  $T_E$ , так что этот вид параметрической качки может возникать при широком диапазоне значений  $T_E$ . При волнении с кормовых курсовых углов может быть замечен переход к гармоническому резонансу.

2. Остойчивость изменяется с периодом столкновения с волной  $T_E$ , который примерно равен половине периода бортовой качки судна ( $T_E = 1/2T_\theta$ ). Остойчивость достигает минимума дважды в течение каждого периода качки  $T_\theta$ . При попутном волнении и волнении с кормовых курсовых

<sup>1</sup> MSC.1/Circ.1228 Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions.

углов, когда  $T_E$  становится больше  $T_0$ , это может происходить только при очень больших периодах  $T_0$ , что указывает на предельное значение остойчивости неповрежденного судна. В результате возникает симметричная качка с большими амплитудами и тенденцией адаптации реакции судна к  $T_E$  из-за снижения остойчивости при нахождении судна на гребне волны. Параметрическая качка с соотношением периодов  $T_E = 1/2T_0$  может также возникать при встречном волнении и волнении с носовых курсовых углов.

Период бортовой качки легко может быть определен при помощи секундомера. Взаимосвязь периода бортовой качки и метацентрической высоты судна определяется «капитанской формулой»:

$$T_0 = \frac{CB}{\sqrt{h}}, \quad (1)$$

где  $T_0$  — период бортовой качки судна, с;  $B$  — ширина судна, м;  $h$  — поперечная МЦВ, м;  $C$  — коэффициент, принятый равным 0,8.

Очевидно, что  $T_0$  зависит от  $h$ . Этим и обуславливается возможность влияния на параметрическую бортовую качку величиной МЦВ. В качестве контролируемых параметров, участвующих в формировании условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки, обычно рассматривают скорость и курс судна. Скорость судна определяет период набегания волн ( $T_E$ ), а курс судна — угол их набегания ( $q$ ).

Период набегания волн на судно рассчитывается следующим образом:

$$T_E = \frac{3T_w^2}{3T_w + V_c \cos q} = \frac{1,92\lambda}{2,4\sqrt{\lambda} + V_c \cos q}, \quad (2)$$

где  $V_c$  — скорость судна, уз;  $q$  — угол набегания волн на судно, град;  $\lambda$  — длина волны, м.

Очевидно, что  $T_E$  зависит от  $V_c \cos q$ , чем и обуславливается возможность влияния на возникновение параметрического резонанса курса и скорости судна.

Условия возникновения параметрического резонанса по бортовой качке предполагают определенное соотношение МЦВ, курса и скорости судна. Если курс и скорость судна традиционно рассматриваются как критерии, определяющие как вход в резонансную зону, так и выход из нее, то влияние МЦВ требует дополнительного изучения.

Поскольку условия параметрического резонанса предполагают соответствующее равенство периодов  $T_E$  и  $T_0$ , изменение в одной части равенства должно быть компенсировано определенным изменением в другой части равенства. Например, изменение МЦВ в составе  $T_0$  должно быть компенсировано изменением  $V_c$  и / или  $q$  в составе  $T_E$ . Это является сутью оценки влияния МЦВ на условия параметрического резонанса по бортовой качке, исследуемого в настоящей работе.

Поскольку настоящая работа является продолжением исследований, проведенных в работе [9], в качестве экспериментального судна здесь также использовался крупнотоннажный контейнеровоз С-класса японской компании Mitsui O. S.K Line MOL Courage (ex. APL Poland) вместимостью 8110 ДФЭ. Судно имеет ширину ( $B$ ) — 45,6 м. Для штормовых условий был рассмотрен диапазон скоростей судна 12–19 уз и диапазон МЦВ — 1,3–10 м. Рассмотрен диапазон длин волн 60–250 м, а в качестве основной выбрана волна, длина которой равна 130 м.

### Результаты (Results)

Значения курсовых углов набегания волн ( $q$ ) были рассчитаны для двух условий возникновения параметрического резонанса по бортовой качке:  $T_E = 1/2T_0$  и  $T_E = T_0$ , при разных значениях МЦВ ( $h$ ) и скорости судна ( $V_c$ ), диапазон которых был выбран исходя из наиболее вероятных практических значений, как отмечалось ранее. Для основного резонанса по бортовой качке ( $T_E = 1/2T_0$ ) были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Угол набегания волн на судно при  $T_E = 1/2T_0$

$h$	$V_c, \text{уз}$							
	12	13	14	15	16	17	18	19
1.3	169	155	147	142	137	134	131	128
1.4	159	149	143	138	134	131	128	126
1.5	152	145	139	135	132	129	126	124
2.0	132	128	125	122	120	118	116	115
2.5	119	116	114	112	111	110	109	108
3.0	108	106	105	104	103	102	102	101
3.5	98	98	97	97	96	96	96	95
3.9	92	91	91	91	91	91	91	91
4.0	90	90	90	90	90	90	90	90
4.1	88	88	89	89	89	89	89	89
4.5	82	83	83	84	84	84	85	85
5.0	74	76	77	78	78	79	80	80
5.5	67	69	70	72	73	74	75	76
6.0	59	62	64	66	67	69	70	71
6.5	51	55	57	60	62	64	65	67
7.0	43	47	51	54	56	59	61	62
7.5	33	39	44	48	51	54	56	58
8.0	19	29	36	41	45	48	51	53
8.1	15	27	34	39	44	47	50	52
8.2	10	25	32	38	42	46	49	52
8.3	—	22	31	36	41	45	48	51
8.4	—	19	29	35	40	44	47	50
8.5	—	15	26	33	38	43	46	49
8.6	—	11	24	32	37	41	45	48
8.7	—	1	22	30	36	40	44	47
8.8	—	—	19	28	34	39	43	46
8.9	—	—	16	26	33	38	42	45
9.0	—	—	12	24	31	36	40	44
9.1	—	—	6	22	30	35	39	43
9.2	—	—	—	19	28	34	38	42
9.3	—	—	—	17	26	32	37	41
9.4	—	—	—	13	24	31	36	40
9.5	—	—	—	9	22	29	35	39
9.6	—	—	—	—	20	28	33	38
9.7	—	—	—	—	18	26	32	37
9.8	—	—	—	—	15	24	31	35
9.9	—	—	—	—	11	23	29	34
10.0	—	—	—	—	6	21	28	33

Полученные результаты в графическом виде приведены на рис. 3.

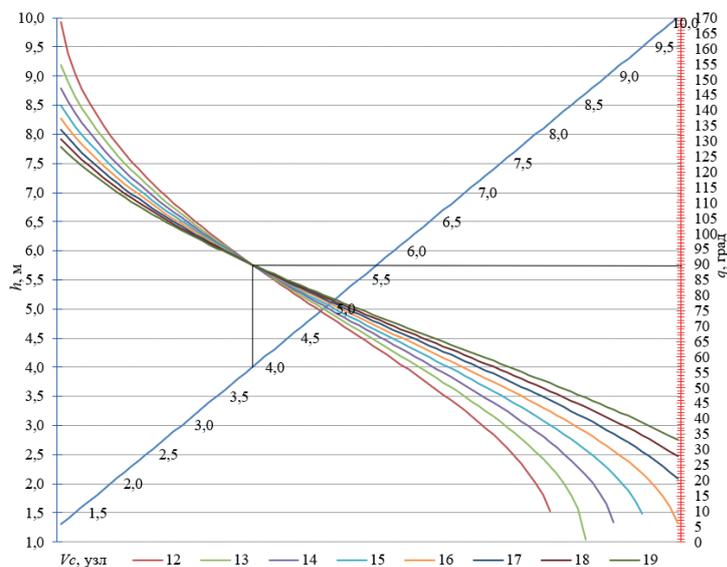


Рис. 3. Номограмма зависимости курсовых углов набегания волн от МЦВ и скорости судна для условий  $T_E = 1/2T_0$  и  $\lambda = 130 \text{ м}$

Для дополнительного резонанса по бортовой качке ( $T_E = T_0$ ) были получены результаты, выдержки из которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Угол набегания волн на судно при  $T_E = T_0$

$h$	$V_c$ , уз							
	12	13	14	15	16	17	18	19
1,3	–	–	–	–	–	–	–	–
1,4	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	–	–	–	–	–	–	–	178
1,6	–	–	–	–	–	–	–	170
1,7	–	–	–	–	–	–	–	166
1,8	–	–	–	–	–	–	–	163
1,9	–	–	–	–	–	–	175	161
2,0	–	–	–	–	–	–	169	159
2,1	–	–	–	–	–	–	166	157
2,2	–	–	–	–	–	–	163	155
2,3	–	–	–	–	–	178	161	153
2,4	–	–	–	–	–	170	159	152
2,5	–	–	–	–	–	167	157	151
2,6	–	–	–	–	–	164	155	149
2,7	–	–	–	–	–	161	154	148
2,8	–	–	–	–	174	159	152	147
2,9	–	–	–	–	169	158	151	146
3,0	–	–	–	–	166	156	150	145
3,1	–	–	–	–	163	154	148	144
3,2	–	–	–	–	161	153	147	143
3,3	–	–	–	175	159	151	146	142
3,4	–	–	–	169	157	150	145	141
3,5	–	–	–	166	156	149	144	140
3,6	–	–	–	163	154	148	143	139
3,7	–	–	–	161	153	147	142	138
3,8	–	–	–	159	151	146	141	138
3,9	–	–	172	157	150	145	140	137
4,0	–	–	168	156	149	144	139	136
4,1	–	–	165	154	148	143	139	135
4,2	–	–	162	153	146	142	138	135
4,3	–	–	160	151	145	141	137	134
4,4	–	–	158	150	144	140	136	133
4,5	–	171	157	149	143	139	136	133
4,6	–	167	155	148	142	138	135	132
4,7	–	165	154	147	142	137	134	131
4,8	–	162	152	146	141	137	133	131
4,9	–	160	151	145	140	136	133	130
5,0	–	158	150	144	139	135	132	129
5,5	161	151	144	139	135	132	129	127
6,0	152	145	139	135	132	129	126	124
6,5	146	140	135	131	128	126	123	121
7,0	141	135	131	128	125	123	121	119
7,5	136	132	128	125	123	120	119	117
8,0	132	128	125	122	120	118	116	115
8,5	128	125	122	120	118	116	114	113
9,0	125	122	119	117	115	114	112	111
9,5	122	119	117	115	113	112	110	109
10,0	119	116	114	112	111	110	109	108

Полученные результаты в графическом виде показаны на рис. 4.

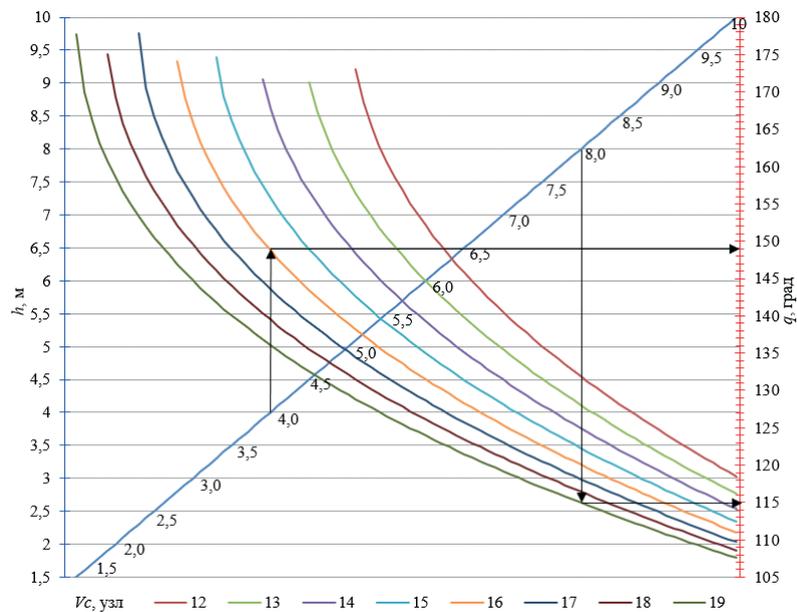


Рис. 4. Номограмма зависимости курсовых углов набегания волн от МЦВ и скорости судна для условий  $T_E = T_\theta$  и  $\lambda = 130$  м

#### Основные результаты

1. Данные табл. 1 и номограмма на рис. 3 для условий  $T_E = 1/2T_\theta$  показывают следующее:

- параметрический резонанс по бортовой качке может возникнуть при любом значении МЦВ в рассматриваемом диапазоне;

- во избежание резонанса при  $V_c = 12$  уз МЦВ должна быть не менее 8,3 м; при  $V_c = 19$  уз — не менее 11,5 м, т. е. за пределами рассматриваемого диапазона;

- при наиболее вероятных сочетаниях  $V_c$  и МЦВ курсовой угол набегания волн, способствующий возникновению параметрического резонанса по бортовой качке, может находиться в широком диапазоне: 1–169°;

- при равной скорости судна увеличение МЦВ приводит к уменьшению угла набегания волн и наоборот. Это уменьшение составляет 4–30°, в среднем — 7° на 50 см увеличения МЦВ. Причем чем меньше скорость, тем больше такое изменение;

- до значений МЦВ = 3,9 м, с увеличением скорости судна, угол набегания волн уменьшается, переходя от кормы к носу. Чем выше значение МЦВ, тем меньше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна, пока оно не достигнет нуля при МЦВ = 4,0 м.

- при значениях МЦВ  $\geq 4,1$  м наблюдается обратная тенденция, когда с увеличением скорости судна угол набегания волн начинает увеличиваться, переходя от носа к корме. Чем выше значение МЦВ, тем больше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна;

- особенности, отмеченные в пп. е) и д) наглядно показаны на рис. 3: линии графика сходятся в одной точке, соответствующей углу набегания волн 90° при МЦВ = 4,0 м, а затем расходятся тем больше, чем больше удаляется значение МЦВ от этой отметки.

2. Данные табл. 2 и номограмма на рис. 4 для условий  $T_E = T_\theta$  показывают следующее:

- параметрический резонанс по бортовой качке не наступает при  $h \leq 1,4$  м для всего диапазона скоростей. Однако поскольку минимальная МЦВ, установленная судовладельцев для контейнеровоза такого типа, составляет 1,3 м, то этот диапазон минимален;

- при  $V_c = 12$  уз МЦВ должна быть не более 5 м, а при  $V_c = 19$  уз МЦВ может быть 1,4 м и менее;

- при наиболее вероятных сочетаниях  $V_c$  и МЦВ курсовой угол набегания волн, способствующий возникновению параметрического резонанса по бортовой качке, может находиться в диапазоне 108–178°;

– при равной скорости судна увеличение МЦВ приводит к уменьшению угла набегания волн. Это изменение составляет  $2-19^\circ$  (в среднем  $4^\circ$  на 50 см изменения МЦВ);

– в рассматриваемом диапазоне МЦВ с увеличением скорости судна угол набегания волн уменьшается, переходя от кормы к носу. Чем выше значение МЦВ, тем меньше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна, пока оно не достигнет нуля при МЦВ = 15,9 м;

– особенности, описанные в пп. г) и д) наглядно показаны на рис. 4: линии графика не сходятся в одной точке, соответствующей углу набегания волн  $90^\circ$ , поскольку относящиеся к ним значения угла набегания волн и МЦВ находятся за пределами рассматриваемого диапазона.

При рассмотрении других длин волн в указанном ранее диапазоне были получены результаты, позволяющие сделать следующие выводы:

1. Для условий основного резонанса по бортовой качке ( $T_E = 1/2T_\theta$ ):

– чем меньше длина волны, тем больше диапазон условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки (например, при длине волны 60 м, никакое практически достижимое и / или допустимое значение МЦВ не позволит обеспечить условия, исключаящие возникновение параметрического резонанса);

– для любой длины волны чем больше скорость судна, тем больший диапазон МЦВ может привести к возникновению параметрической бортовой качки;

– для любой длины волны чем меньше МЦВ, тем больший диапазон скоростей может привести к возникновению параметрической бортовой качки. При этом, очевидно, что МЦВ должна находиться в диапазоне значений, когда параметрический резонанс не наступает или наступает при любой скорости;

– с учетом всех рассматриваемых значений МЦВ и скорости судна диапазон углов набегания волн на судно, при котором может возникнуть параметрическая бортовая качка, будет меняться в зависимости от длины волны, сначала увеличиваясь с увеличением длины волны, а потом, достигнув максимума, уменьшаясь. Наиболее широкий диапазон углов набегания волн соответствует длине волны 130 м:  $1^\circ \leq q \leq 169^\circ$ . Наименьший диапазон углов набегания волн соответствует длине волны 60 м:  $83^\circ \leq q \leq 162^\circ$ .

2. Для условий дополнительного резонанса по бортовой качке ( $T_E = T_\theta$ ):

– при изменении длины волны не наблюдается однозначного изменения значений МЦВ и скорости судна, способствующих возникновению параметрической бортовой качки;

– при уменьшении длины волны до некоторого значения ( $\lambda = 160$  м) диапазон условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки, уменьшается, а при дальнейшем уменьшении длины волны, начинает увеличиваться;

– при увеличении длины волны минимальное значение угла набегания волн уменьшается (от  $136^\circ$  до  $81^\circ$ ), а максимальное почти не изменяется и составляет  $175-179^\circ$ , т. е. сектор курсовых углов параметрической бортовой качки в основном расположен позади траверза и на траверзе;

– с учетом всех рассматриваемых значений МЦВ и скорости судна диапазон углов набегания волн на судно, при котором может возникнуть параметрическая бортовая качка, будет тем шире, чем больше длина волны: при  $\lambda = 230$  м  $81^\circ \leq q \leq 178^\circ$ ; при  $\lambda = 60$  м  $136^\circ \leq q \leq 179^\circ$ .

### Обсуждение (Discussion)

На рис. 3 видна характерная точка пересечения линий графиков, соответствующая значению МЦВ, равному 4 м, когда для всего диапазона скоростей угол набегания волн, соответствующий параметрическому резонансу по бортовой качке, будет равен  $90^\circ$ . Это обусловлено тем, что  $\cos 90^\circ = 0$ , и, соответственно,  $V_c \cos q = 0$ , поэтому величина МЦВ будет одинакова для всего диапазона скоростей судна, поскольку в этом случае

$$h = \frac{1,57(CB)^2}{\lambda}. \quad (6)$$

На рис. 4 показан пример использования номограммы: для  $h = 4$  м и  $V_c = 16$  уз, когда угол набегания волн, при котором может возникнуть параметрический резонанс по бортовой качке, со-

ставляет  $149^\circ$ , для  $h = 8$  м и  $V_c = 19$  уз угол набегания волн составляет  $115^\circ$ . В рассматриваемом диапазоне МЦВ (1,3–10 м) линии графиков на номограмме не пересекаются.

В работе [8] получено, что МЦВ контейнеровоза может изменяться в диапазоне 7–79 см только из-за изменения аппликаты ЦТ контейнеров, а в работе [9] диапазон изменений МЦВ составил 6–64 см. Поэтому вполне уместно рассматривать возможное изменение МЦВ контейнеровоза на 50 см с учетом фактических аппликат ЦТ контейнеров.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что изменение МЦВ оказывает влияние на исследуемые параметры формирования параметрического резонанса по бортовой качке. Поэтому можно сделать следующие выводы:

1. Для условий основного резонанса по бортовой качке ( $T_E = 1/2T_\theta$ ):

– чем ниже скорость судна, тем больше возможностей для выхода из параметрического резонанса за счет увеличения МЦВ;

– для выхода из параметрического резонанса необходимо уменьшать скорость и / или увеличивать МЦВ. При этом необходимо учитывать, что возможности увеличения МЦВ могут быть ограничены требованиями безопасности и техническими возможностями.

2. Для условий дополнительного резонанса по бортовой качке ( $T_E = T_\theta$ ):

– чем ниже скорость судна, тем больше возможностей выхода из параметрического резонанса за счет уменьшения МЦВ;

– для выхода из параметрического резонанса необходимо уменьшать скорость и / или МЦВ.

При этом важно учитывать, что возможности увеличения МЦВ могут быть ограничены требованиями безопасности и техническими возможностями.

### Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчетов подтвердили влияние МЦВ на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Это дает возможность утверждать, что учет фактической МЦВ важен для прогнозирования параметрического резонанса и его избегания.

2. На практике параметры качки судна определяются непосредственным измерением ее периодов, периода волнения и глазомерной оценкой длины волн. Без применения каких-либо специальных средств и способов фактическую МЦВ можно определить только по периоду бортовой качки во время плавания судна в море. Однако понимание того, каким образом изменения МЦВ влияют на параметры качки, представляется очень важным для общего понимания управления судном в штормовых условиях и обеспечения его безопасной эксплуатации еще на этапе планирования рейса. Определение МЦВ судна, учитывая фактические аппликаты ЦТ контейнеров, дает возможность заблаговременного определения потенциально опасных условий плавания судна в предстоящем рейсе.

3. Понимание того, как изменения МЦВ и скорости судна влияют на условия возникновения параметрического резонанса по бортовой качке, позволяет их корректировать для достижения наиболее благоприятных условий плавания. Очевидно, что изменение МЦВ путем манипуляций с балластом должно выполняться с особой осторожностью, чтобы не подвергнуть судно опасности. В частности, всегда должно выполняться требование по минимальному значению МЦВ, а при увеличении МЦВ необходимо учитывать возможные негативные последствия из-за увеличения интенсивности бортовой качки.

4. Для того, чтобы фактические данные о массе и аппликате ЦТ контейнеров могли использоваться при планировании загрузки судна, они должны быть получены на этапе подготовки контейнера к транспортировке и доводиться до сведения всех участников перевозки, включая экипаж судна. Этот обмен данными может быть выполнен в рамках системы оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК), описанной в работе [10].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uzonoglu C. E.* Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves: Thesis for obtaining the degree of Master of Science / C. E. Uzonoglu. — Universidade Técnica de Lisboa, 2011. — 98 p.
2. *Van Laarhoven B. J. H.* Stability Analysis of Parametric Roll Resonance: Traineeship report / B. J. H Van Laarhoven. — Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009. — 37 p.
3. *Míguez González M.* A study of ship parametric roll resonance for the evaluation of preventive strategies: Tesis Doctoral / M. Míguez Gonzalez. — Universidade Da Coruna, 2012. — 343 p.
4. *France W. N.* An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems / W. N. France, M. Levadou, T. W. Treackle, J. R. Paulling, R. K. Michel, C. Moore // *Marine Technology and SNAME news*. — 2003. — Vol. 40. — Is. 01. DOI: 10.5957/mt1.2003.40.1.1.
5. *Ершов А. А.* Практический способ определения резонанса по бортовой качке судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-18-25.
6. *Ершов А. А.* Диаграмма для определения опасных областей при движении судна в штормовом море / А. А. Ершов, С. В. Сольнов, А. М. Бояринов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 2. — С. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-22-27.
7. *Семенова В. Ю.* Определение амплитуд параметрической бортовой качки судна при различных вариантах нагрузки / В. Ю. Семенова, Д. А. Альбаев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 3–1 (41). — С. 34–44.
8. *Царик Р. С.* Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.
9. *Царик Р. С.* Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.
10. *Царик Р. С.* Система оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК) / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2015. — № 2 (75). — С. 16–23.

## REFERENCES

1. Uzonoglu, Cihan Emre. Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves. Thesis for obtaining the degree of Master of Science. Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
2. Van Laarhoven B. J.H. Stability Analysis of Parametric Roll Resonance. Traineeship report. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009.
3. Míguez González, Marcos. A study of ship parametric roll resonance for the evaluation of preventive strategies. Tesis Doctoral. Universidade Da Coruna, 2012.
4. France, William N., Marc Levadou, Thomas W. Treakle, J. Randolph Paulling, R. Keith Michel, and Colin Moore. “An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems.” *Marine Technology and SNAME news* 40.1 (2003). DOI: 10.5957/mt1.2003.40.1.1.
5. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. “Practical method for determining the parametric resonance of rolling of the vessel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-18-25.
6. Ershov, Andrey Aleksndrovich, Sergei Veniaminovich Solnov, and Alexander Michailovich Boyarinov. “Diagram for determining dangerous zones when sailing in heavy weather.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2018): 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-22-27.
7. Semenova, Viktoriya Yu., and Danil A. Al’baev. “The determination of the amplitudes of the parametric rolling of ship in various loading.” *Marine intelligent technologies* 3–1(41) (2018): 34–44.
8. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. “Evaluation of influence of container’s center of gravity position on container ship’s metacentric height.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta*

*morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

9. Tsarik, Ruslan Stanislavovich. “Evaluating the influence of the standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of a container ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.

10. Tsarik, R.S., and D. A. Akmaykin. “Operational control system of container ship’s cargo operations (OCSCCO).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(75) (2015): 16–23.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Царик Руслан Станиславович** —  
капитан, инструктор-преподаватель ДВМТЦ  
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»  
690003, Российская Федерация,  
Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, д. 50а  
e-mail: [rex-infinity@yandex.ru](mailto:rex-infinity@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tsarik, Ruslan Stanislavovich** —  
Master mariner, instructor-trainer  
Maritime State University named after  
admiral G. I. Nevelskoi  
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,  
Russian Federation  
e-mail: [rex-infinity@yandex.ru](mailto:rex-infinity@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 25 апреля 2021 г.  
Received: April 25, 2021.*