

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ КОНТЕЙНЕРА НА МЕТАЦЕНТРИЧЕСКУЮ ВЫСОТУ КОНТЕЙНЕРОВОЗА**

*Высота центра тяжести контейнера нормирована ведущими классификационными обществами как половина высоты контейнера. В основе расчетных алгоритмов грузовых программ, используемых на контейнеровозах, лежит правило, согласно которому центр тяжести контейнера соответствует его геометрическому центру. При этом на практике очень часто фактический центр тяжести не совпадает с геометрическим, что приводит к изменению значения метацентрической высоты судна как одного из критериев остойчивости. В результате экипаж судна получает недостоверные данные о значении метацентрической высоты. Последующие операции по балластировке и бункеровке судна, основанные на неверных данных, могут, как минимум, привести к неоправданным расходам или даже оказать негативное воздействие на безопасность судна. В работе предложен алгоритм оценки влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза. Поставлены задачи: определить возможное положение центра тяжести контейнера исходя из реальных требований технологии перевозки грузов в контейнерах; оценить влияние изменения положения центра тяжести в установленных пределах на остойчивость контейнеровоза расчетно-экспериментальным путем с использованием программ расчета остойчивости действующих современных крупнотоннажных контейнеровозов. Рассмотрены несколько вариантов загрузки контейнеровозов двух типов: реальные варианты загрузки и смоделированные — включающие условия, заданные в рамках данной работы. В ходе расчетного эксперимента получены результаты, позволяющие считать, что принятые стандарты в отношении положения центра тяжести контейнера обоснованы. Доказано, что фактическое положение центра тяжести контейнера практически всегда приводит к увеличению фактической метацентрической высоты судна по сравнению с расчетной. Подчеркнуто, что экипажу судна важно располагать достоверной информацией о положении центра тяжести контейнеров на стадии планирования загрузки для обеспечения безопасности и экономически эффективной работы судна.*

*Ключевые слова: суда-контейнеровозы, контейнеры, центр тяжести, эксцентриситет, метацентрическая высота, остойчивость, балластировка, безопасность, экономическая эффективность.*

### **Введение**

Будучи многооборотной тарой, контейнер загружается различными грузами с различными схемами и качеством укладки. От того, как размещен груз внутри контейнера, зависит положение его центра тяжести (ЦТ), что, в свою очередь, влияет на безопасность контейнерных перевозок. Основными документами, регламентирующими безопасность морской перевозки контейнеров, являются:

- Международная конвенция по безопасным контейнерам (КБК) 1972 г.;
- MSC.1/Circ.1497 IMO / ILO / UNECE Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code);
- MSC.1/Circ.1498 Informative material related to the Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code);
- Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом (РД 31.11.2118-96).

В этих документах, а также в правилах классификационных обществ (КО) устанавливаются нормативы в отношении положения ЦТ контейнера. Фактический ЦТ контейнера может не совпадать с его геометрическим ЦТ как по высоте, так и в продольной плоскости (вдоль и поперек контейнера) — это несоответствие называется *эксцентриситетом контейнера*. В международном стандарте ИСО 830:1999 «Контейнеры грузовые. Словарь» эксцентриситет определен как «продольное и / или поперечное горизонтальное расстояние между положением центра тяжести контейнера (порожного или загруженного, с фитингами и приспособлениями или без них) и геометри-

ческим центром диагоналей между четырьмя нижними угловыми фитингами». Следует отметить, что приведенное понятие эксцентриситета охватывает только продольное отстояние. В то же время правила КО больше внимания уделяют нормированию аппликаты ЦТ. Продольное отстояние ЦТ в значительной степени влияет на сбалансированность контейнера, что критически важно при погрузочно-разгрузочных работах, а также при перевозке контейнеров автомобильным транспортом. При этом учет аппликаты ЦТ необходим при определении ЦТ судна и расчете его остойчивости [1].

В контексте данной статьи определяющим является рассмотрение только вертикального ( $\Delta Z$ ) отклонения фактического ЦТ контейнера от геометрического ЦТ, поэтому под эксцентриситетом понимается вертикальное отклонение фактического ЦТ контейнера от геометрического центра. При этом в используемых в работе схемах и рисунках (для большей наглядности) отображается и продольное отстояние ( $\Delta X$ ).

Несмотря на вероятность наличия эксцентриситета, КО в своих правилах устанавливают нормативы в отношении расчетного положения ЦТ. Эти нормативы используются в алгоритмах расчета остойчивости контейнеровозов. Информация об остойчивости, в которой приводится такой алгоритм расчета, имеется на каждом судне. Кроме того, на каждом современном контейнеровозе имеется специальная грузовая программа, используемая для автоматизированного расчета остойчивости по тому же самому алгоритму. В качестве исходных данных здесь используются координаты ЦТ погруженных на судно контейнеров. Эти координаты устанавливаются исходя из нормативов соответствующего КО, некоторые примеры которых приведены далее. Таким образом, расчет остойчивости, выполняемый с учетом этих допущений, заведомо включает в себя погрешность, вызванную возможным эксцентриситетом контейнера.

До 1 июля 2016 г. — даты вступления в силу поправок к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС) — четкий механизм предоставления достоверных данных хотя бы о массе контейнера, не говоря уже о положении его ЦТ, отсутствовал. Сейчас определение достоверной массы контейнера вошло в практическую стадию, однако вероятность эксцентриситета контейнера все еще остается задачей, требующей решения.

В данной работе авторами выполнена оценка влияния эксцентриситета контейнеров на поперечную остойчивость контейнеровозов и того, насколько это критично с практической точки зрения. Оценка проводилась по одному из основных критериев остойчивости — поперечной метацентрической высоте. Для постановки и решения задачи в работе используются обозначения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Обозначения, принятые в работе**

Обозначение	Наименование
$W$	Водоизмещение судна, т
$GM$	Начальная метацентрическая высота, м
$GM'$	Начальная метацентрическая высота, измененная наличием эксцентриситета контейнеров, м
$\Delta GM$	Изменение значения $GM$ , м; $\Delta GM = GM' - GM$
$KM$	Аппликата метацентра судна от основной плоскости, м
$KG$	Аппликата центра тяжести судна от основной плоскости, м
$KG'$	Аппликата центра тяжести судна от основной плоскости, измененная наличием эксцентриситета контейнеров, м
$KG_s$	Аппликата центра тяжести контейнерного штабеля от основной плоскости, м
$\Delta KG$	Изменение значения $KG$ , м; $\Delta KG = KG' - KG$
$VCG_s$	Аппликата центра тяжести контейнерного штабеля от его основания, м

Таблица 1  
(Окончание)

$VCG_i$	Аппликата центра тяжести контейнера от его днища, м
$\Delta VCG$	Изменение значения $VCG$ , м
$D$	Возвышение над основной плоскостью основания, на которое погружен контейнер (настил двойного дна, крышка трюма или контейнер нижнего яруса), м
$M_i$	Масса контейнера, т
$\Delta X$	Продольное отстояние ЦТ контейнера от геометрического центра
$\Delta Z$	Вертикальное отстояние ЦТ контейнера от геометрического центра; $\Delta Z = \Delta VCG_i$
$M_z$	Момент относительно основной плоскости судна, тм; $M_z = M_i \cdot VCG_i$
$\Sigma M_z$	Суммарный (общий) момент $M_z$ судна, тм
$N$	Количество контейнеров на борту судна (ДФЭ)

### Положение ЦТ контейнера и контейнерного штабеля

Положение ЦТ контейнера в пространстве определяется тремя координатами: абсциссой, ординатой и аппlikатой. В зависимости от решаемой задачи, в качестве систем координат целесообразно использовать две системы (рис. 1 и 2):

- система координат, привязанная к контейнеру или контейнерному штабелю;
- система координат, привязанная к судну.

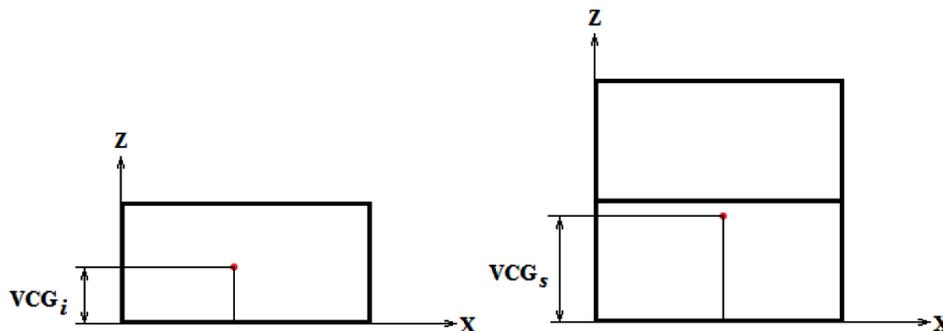


Рис. 1. Система координат, привязанная к контейнеру или контейнерному штабелю

При решении задачи расположения непосредственно ЦТ контейнера, в зависимости от того, как в него загружен груз, необходимо использовать первую систему координат. В этой системе используется значение  $VCG_i$ .  $VCG_s$  отсчитывается от днища нижнего контейнера.

При расчете остойчивости судна и оценке положения ЦТ погруженных контейнеров как судового груза необходимо использовать вторую систему координат. В этой системе отсчет положения ЦТ ведется от основной плоскости (киля судна):  $KG$  — есть расстояние между точками  $K$  (киль) и  $G$  (центр тяжести).

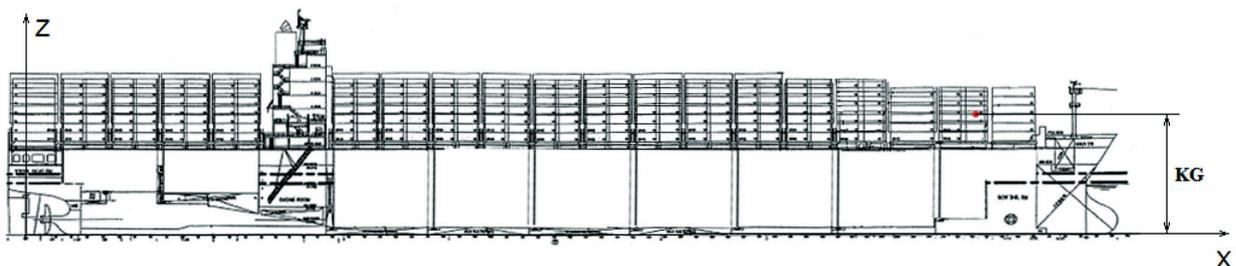


Рис. 2. Система координат, привязанная к судну

Величины  $KG$  и  $VCG$  связаны между собой следующим образом:

$$KG = VCG + D.$$

ЦТ контейнерного штабеля рассчитывается по формуле

$$VCG_s = \frac{\sum M_i VCG_i}{\sum M_i}$$

или

$$KG_s = \frac{\sum M_i VCG_i}{\sum M_i} + D. \quad (1)$$

### Категории контейнеров и соответствующее положение ЦТ

Следует выделить две принципиальные категории контейнеров:

- закрытые контейнеры (любые контейнеры с жестким замкнутым контуром);
- открытые контейнеры (любые открытые контейнеры: платформы, флэтрэки, контейнеры с открытым верхом и т. д.).

Основными типами закрытых контейнеров являются:

- генеральные;
- рефрижераторные;
- танк-контейнеры;
- балк-контейнеры.

В танк- и балк-контейнерах перевозится гомогенный груз, который равномерно заполняет внутренний объем контейнера. В этом случае, при условии полного заполнения контейнера, его фактический ЦТ с некоторым допущением будет соответствовать геометрическому ЦТ контейнера, поэтому проблема эксцентриситета ЦТ в этом случае не возникает.

Стандартные генеральные контейнеры составляют большую часть в объемах контейнерных перевозок. По состоянию загрузки генеральный контейнер может быть:

- порожним;
- полностью загруженным;
- частично загруженным.

Порожний контейнер представляет собой самый простой вариант в контексте рассматриваемой задачи. Фактический ЦТ порожнего контейнера практически полностью совпадает с его геометрическим центром (небольшое отклонение возникает по причине того, что днище контейнера обычно тяжелее крыши). Сложнее обстоят дела с полностью загруженным контейнером. В понятие «полностью загруженный контейнер» можно включить:

- контейнер, полностью загруженный по объему;
- контейнер, полностью загруженный по массе.

Данные по положению аппликаты ЦТ контейнера можно свести в табл. 2.

Таблица 2

Данные по положению аппликаты ЦТ контейнера

Вариант загрузки контейнера	Положение аппликаты ЦТ
Порожний	В геометрическом центре
Полностью загруженный по объему*	Немного ниже геометрического центра
Полностью загруженный по массе	Ниже геометрического центра
Частично загруженный	Ниже геометрического центра
Нестандартная загрузка	Выше геометрического центра

\* Важно отметить, что полностью использовать объем контейнера при загрузке генерального груза практически невозможно.

Это объясняется:

- зазорами между упаковками груза;
- технологическими пустотами, необходимыми для установки крепежных материалов;
- пустотами в верхней части контейнера, куда затруднительно подобраться;
- пустотами, образованными по причине того, что габариты упаковки не кратны внутренним габаритам контейнера.

Можно сделать промежуточный вывод о том, что аппликата ЦТ контейнера, за исключением особых случаев, может либо соответствовать геометрическому центру, либо быть ниже его.

### Нормирование положения ЦТ

Решая задачи безопасности морских грузоперевозок, классификационные общества, как технические институты, устанавливают нормативы в отношении расчетной аппликаты ЦТ контейнера, которая влияет на состояние остойчивости судна. В правилах разных КО нормативы в отношении ЦТ могут несколько отличаться, но в целом они близки к тому, чтобы считать, что аппликата ЦТ соответствует половине высоты контейнера. Так,

– Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) установлено, что «при расчетах остойчивости контейнеровозов положение центра тяжести каждого контейнера по высоте принимается равным половине высоты контейнера данного типа»;

– Правилами American Bureau of Shipping (ABS) установлено, что «The center of gravity of the container may be normally considered as the midpoint of the container (ЦТ контейнера обычно может считаться соответствующим геометрическому центру контейнера)»;

– Правилами Germanischer Lloyd (GL) установлено, что: «The height of the center of gravity of the container and its cargo is assumed at 45 % of container height (аппликата ЦТ контейнера и его груза принимается равной 45% высоты контейнера)»;

– Кодекс STU (разд. 3.1.4) устанавливает, что «ЦТ груза в контейнере, в общем случае, может отклоняться продольно и поперечно от геометрического ЦТ контейнера на  $\pm 5\%$ , но в отдельных случаях эта величина может достигать  $\pm 10\%$ , что определяется возможностью современного контейнерного перегрузочного оборудования смещать точку подвеса в зависимости от сбалансированности контейнера»;

– в РД 31.11.21.18-96 (разд. 3.1.3.9) предусмотрено, что «абсцисса ЦТ контейнера не должна отстоять более чем на 60 см от геометрического ЦТ 20-футового контейнера, и 120 см от геометрического ЦТ 40-футового контейнера, что составляет 10 % длины соответствующего контейнера»;

– в кодексе STU приводится диаграмма распределения нагрузок (ДРН) на примере 40-футового контейнера (рис. 3). Она позволяет определить допустимое продольное отклонение ЦТ груза в контейнере ( $\Delta X$ ) в зависимости от его массы. ДРН наглядно показывает, что чем тяжелее груз, тем ближе к середине контейнера (геометрическому центру) он должен быть расположен.

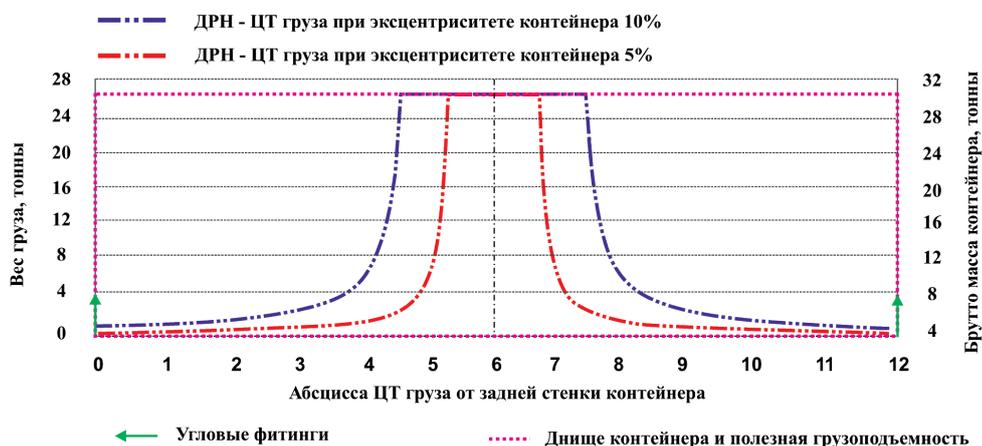


Рис. 3. Диаграмма распределения нагрузок (40-футовый контейнер)

Таким образом, можно резюмировать возможные пределы (рис. 4) эксцентриситета контейнера. Уместно считать, что продольное отклонение ЦТ в случае перевозки грузов с малым удельно погрузочным объемом (УПО) будет меньше, чем при перевозке грузов с УПО больших значений, поэтому можно предположить, что схематическая зона возможного эксцентриситета контейнера будет иметь форму трапеции, обращенной малым основанием вниз.

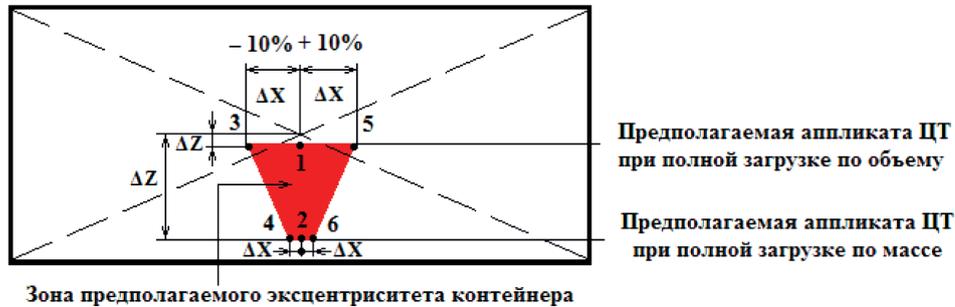


Рис. 4. Предполагаемый эксцентриситет контейнера

С учетом того, что на величину поперечной метацентрической высоты влияет только  $\Delta Z$ , в расчетах будут использоваться только два положения ЦТ: в точках 1 и 2.

#### Возможные пределы аппликаты ЦТ контейнера

Максимальная аппликата, как было уже сказано, немного меньше аппликаты геометрического центра. Предположим, что генеральный груз загружен в контейнер равномерно, но остается технологическая пустота в верхней части контейнера высотой 30 см. В этом случае фактический ЦТ контейнера будет ниже геометрического на 15 см. Если принять, что минимальный УПО перевозимого в контейнере груза (свинец) —  $0,2 \text{ м}^3/\text{т}$ , и учесть одну из принятых форм транспортировки свинца (паллетами  $72,5 \times 72,5 \times 50 \text{ см}$ ), то высота штабеля груза составит около 50 см. При этом груз будет равномерно распределен по днищу контейнера, и грузоподъемность будет полностью выбрана. В этом случае аппликата фактического ЦТ груза с учетом технологических пустот может быть принята равной 24 см. Пределы аппликаты ЦТ контейнера могут быть приняты и другими в зависимости от конкретных условий загрузки контейнеров и других факторов. При этом физическая сущность и схема расчетов останутся неизменными.

В данной работе расчеты основаны на ДФЭ — стандартном 20-футовом контейнере, высота которого 2,6 м, а аппликата геометрического центра, соответственно, 1,3 м. В случае с контейнерами повышенной вместимости (хай-кьюб), высота которых составляет 2,9 м, аппликата геометрического центра должна устанавливаться равной 1,45 м соответственно.

#### Нестандартные случаи загрузки

Нормативные документы — MSC.1/Circ.1497 IMO / ILO / UNECE Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code), раздел 1.11; MSC.1/Circ.1498 Informative material related to the Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code), разд. 1.5.7; Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом (РД 31.11.2118-96), разд. 3.1.9 — допускают такую загрузку контейнера, при которой центр тяжести груза будет выше половины высоты контейнера (рис. 5, а). При этом четко говорится, что загрузка такого контейнера и его транспортировка должны выполняться по согласованию с участниками перевозки и под особым контролем. Уместно считать, что такие контейнеры занимают незначительную часть в общем объеме перевозимого груза на судне, тем не менее, учет их влияния на остойчивость осуществляется в установленном порядке.

Как пример неблагоприятного, с точки зрения технологии перевозки грузов, варианта, можно допустить такую загрузку судна, при которой тяжелые контейнеры окажутся поверх порожних. Это может быть вызвано необходимостью обеспечить очередность выгрузки в соответствии с ротацией портов. Пример такой ситуации и соответствующий эксцентриситет изображены на рис. 5, б.

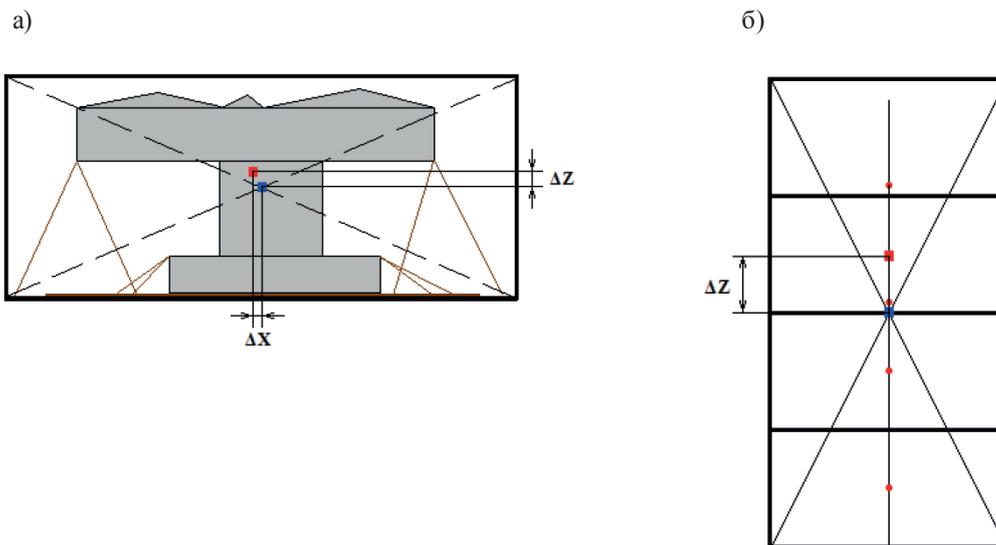


Рис. 5. Нестандартный груз с ЦТ выше геометрического ЦТ контейнера — а;  
ЦТ штабеля при загрузке тяжелых контейнеров поверх порожних — б

### Определение поперечной метацентрической высоты

Метацентрическая высота ( $GM$ ) рассчитывается по формуле

$$GM = KM - KG. \quad (3)$$

Значение  $KG$  судна рассчитывается по формуле

$$KG = \frac{\sum M_z}{W}. \quad (4)$$

Поскольку в данной работе рассматривается влияние груза на остойчивость, остальные статьи нагрузок (балласт, топливо и другие запасы) при выполнении расчетов считаются постоянными, в то время как положение ЦТ контейнеров будет меняться. Метацентрическая высота впоследствии исправляется поправками на свободную поверхность жидких запасов по установленной расчетной схеме [2].

Рассматривая формулу (3) следует отметить, что при разных аппликатах ЦТ судна, но при одинаковом водоизмещении, что соответствует принятым в данной работе условиям, аппликата метацентра ( $KM$ ) остается неизменной, а значение  $KG$ , напротив, будет изменяться. Таким образом, используя формулу (3), суть рассматриваемого вопроса можно записать как

$$\Delta GM = -\Delta KG, \quad (5)$$

т. е. для оценки влияния положения ЦТ на остойчивость судна достаточно определить изменение аппликаты ЦТ ( $\Delta KG$ ) для данного состояния загрузки судна.

Следует разделять три значения нормированной метацентрической высоты:

- минимальное нормированное (устанавливается ИМО для контейнеровозов 0,15 м и соответствующим КО);
- эксплуатационное (устанавливается судовладельцем);
- аварийное.

### Алгоритм оценки

1. Опытным путем и / или с учетом конкретных данных (вида перевозимого груза, его транспортных характеристик, схемы загрузки контейнера, высоты контейнера и т. п.), определяются экстремальные (минимальное и максимальное) значения аппликаты ЦТ контейнера ( $VCG_i$ ) и их изменение ( $\Delta VCG$ ) относительно стандартной аппликаты ЦТ.

2. Определяются ЦТ штабелей контейнеров ( $KG_s$ ) для каждого бэя по формуле (1). При этом, если изменение аппликаты ЦТ контейнеров в штабеле принимается одинаковым, то изменение  $KG_s$  штабеля будет равно изменению  $VCG$  контейнера в штабеле:  $\Delta KG_s = \Delta VCG_i$ . В этом случае достаточно взять из Информации об остойчивости судна имеющееся значение  $KG_s$  для данного штабеля и изменить его на значение  $\Delta KG_s$ , не выполняя расчетов по формуле (1).

3. Полученные значения  $KG_s$  контейнерных штабелей вносятся в бланк расчета остойчивости или в грузовую программу.

4. Получаются измененное значение  $KG$  судна ( $KG'$ ) и соответствующее измененное значение метацентрической высоты ( $GM'$ ).

5. Сравнивая исходное значение  $GM$  и полученное значение  $GM'$ , получаем  $\Delta GM$ .

### Расчетный эксперимент

В данной работе для определения изменения аппликаты ЦТ ( $\Delta KG$ ) было рассмотрено десять вариантов типовой загрузки с двумя экстремальными аппликатами ЦТ контейнера (согласно рис. 4) контейнеровоза вместимостью 8110 ДФЭ, серия которых была построена в 2007 – 2014 гг. на судовой верфи *Mitsubishi Heavy Industries*, Япония (серия контейнеровозов С-класса компании *Mitsui O.S.K Line*), а также пять вариантов реальной загрузки контейнеровоза на 6725 ДФЭ, серия которых была построена в 2009 – 2011 гг. на судовой верфи *Mitsubishi Heavy Industries*, Япония (серия контейнеровозов М-класса компании *Mitsui O.S.K Line*). Поскольку физическая и математическая сущность расчетов одинакова для всех вариантов, такое их количество считается достаточным для оценки.

Таблица 3

Обработка вариантов загрузки для контейнеровоза на 8110 ДФЭ

Вариант загрузки	Кол-во контейнеров (ДФЭ)	Стандартная аппликата ЦТ		Аппликата 1 (-0,15 м)			Аппликата 2 (-1,06 м)		
		$KG$	$GM$	$KG_s$	$\Delta KG$	$GM'$	$KG_s$	$\Delta KG$	$GM'$
1	7593	20,04	1,58	19,96	0,08	1,66	19,45	0,59	2,17
2	7718	20,11	1,52	20,02	0,09	1,61	19,50	0,61	2,13
3	7144	20,25	1,40	20,17	0,08	1,48	19,60	0,65	2,05
4	7265	19,92	1,70	19,83	0,09	1,79	19,29	0,63	2,33
5	5468	19,16	2,47	19,06	0,10	2,57	18,37	0,79	3,26
6	5937	19,96	1,66	19,86	0,10	1,76	19,24	0,72	2,38
7	8050	19,21	2,43	19,14	0,07	2,50	18,68	0,53	2,96
8	7820	20,02	1,61	19,93	0,09	1,70	19,38	0,64	2,25
9	7912	18,78	2,85	18,71	0,07	2,92	18,26	0,52	3,37
10	7544	18,37	3,28	18,30	0,07	3,35	17,87	0,50	3,78

По результатам, представленным в табл. 3, составлены графики (рис. 6), на которых видно, что изменение метацентрической высоты судна в случае понижения ЦТ контейнера на 0,15 м, колеблется в пределах 0,07 – 0,1 м, а в случае понижения ЦТ на 1,06 м — в пределах 0,50 – 0,79 м. Для данного судна судовладельцем установлена минимальная эксплуатационная метацентрическая высота в 1,3 м.

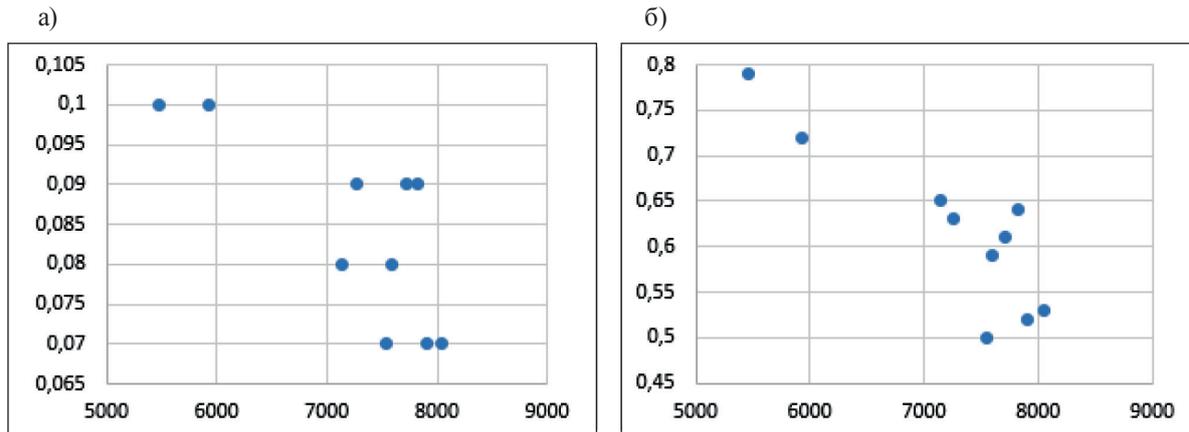


Рис. 6. Графики аппликат ЦТ по результатам, представленным в табл. 3:  
а) аппликата 1 — пониженная на 0,15 м от геометрического центра контейнера;  
б) аппликата 2 — пониженная на 1,06 м от геометрического центра контейнера

Таблица 4

**Обработка вариантов загрузки для контейнеровоза на 6725 ДФЭ**

Вариант загрузки	Кол-во контейнеров (ДФЭ)	Стандартная аппликата ЦТ		Аппликата 1 (-0,15 м)			Аппликата 2 (-1,06 м)		
		$KG$	$GM$	$KG_s$	$\Delta KG$	$GM'$	$KG_s$	$\Delta KG$	$GM'$
1	6231	16,22	4,48	16,18	0,04	4,52	15,80	0,44	4,92
2	5924	17,79	2,94	17,71	0,08	3,02	17,24	0,55	3,49
3	5426	17,75	3,16	17,68	0,07	3,23	17,23	0,52	3,68
4	5058	16,74	4,03	16,67	0,07	4,10	16,23	0,51	4,54
5	4798	17,03	3,78	16,96	0,07	3,85	16,54	0,49	4,27

По результатам, представленным в табл. 4, составлены графики (рис. 7), на которых видно, что изменение метацентрической высоты судна в случае понижения ЦТ контейнера на 0,15 м, колеблется в пределах 0,04 – 0,07 м. А в случае понижения ЦТ на 1,06 м — в пределах 0,44 – 0,55 м. Для данного судна судовладельцем установлена минимальная эксплуатационная метацентрическая высота в 1,2 м.

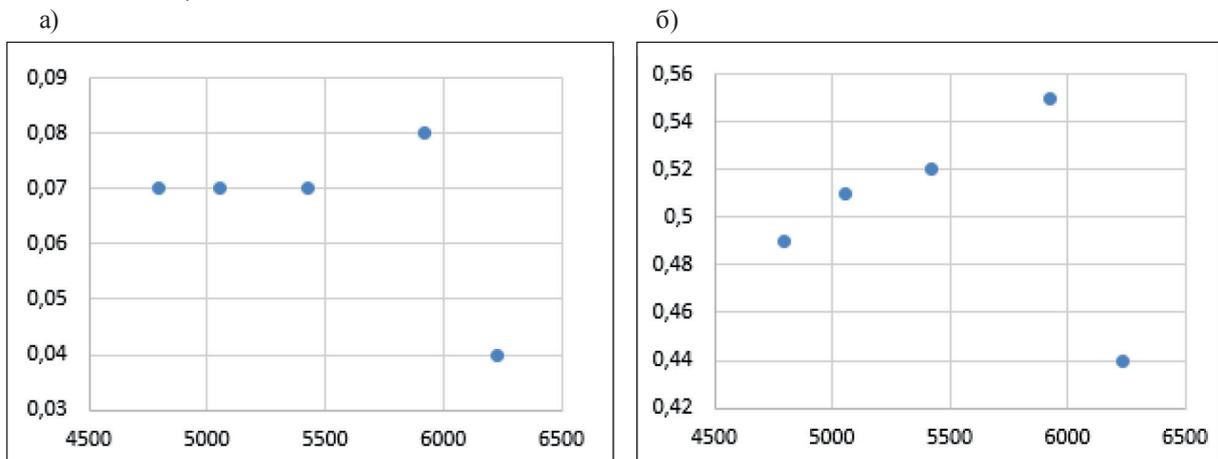


Рис. 7. Графики аппликат ЦТ по результатам, представленным в табл. 4:  
а — аппликата 1 — пониженная на 0,15 м от геометрического центра контейнера;  
б — аппликата 2 — пониженная на 1,06 м от геометрического центра контейнера

### Практическое применение

В данной работе было установлено, что изменение аппликаты ЦТ контейнера, за исключением редких случаев, приводит к увеличению поперечной метацентрической высоты судна. Предложенная методика позволяет определить пределы возможного изменения метацентрической высоты. Если же аппликата ЦТ контейнера будет известна точно, то это позволит определить и точное фактическое значение метацентрической высоты.

На практике это позволит, в частности, более точно оперировать судовым балластом для уменьшения его количества на борту при одновременном поддержании метацентрической высоты на заданном уровне. Снижение количества неэффективного балласта позволит уменьшить водоизмещение судна, что в определенных условиях позволяет снизить расход топлива. Это, в свою очередь, будет способствовать прямой экономии средств судовладельца и снижению выброса загрязняющих веществ в атмосферу. Кроме того, уменьшенное водоизмещение выражается в меньшей осадке судна, что также может способствовать экономии средств судовладельца при прохождении судна через режимные акватории, такие, например, как Панамский и Суэцкий каналы, а также в портах, где лоцманский сбор осуществляется по максимальной осадке.

Влияние свободной поверхности на метацентрическую высоту определяется программой расчета остойчивости в текущем режиме: при любом изменении объема жидких запасов. На практике возникает необходимость компенсации нагрузок на корпус контейнеровоза посредством принятия балласта. Причем это является более приоритетной задачей, чем недопущение появления свободной поверхности. Несмотря на негативное влияние свободной поверхности на значение метацентрической высоты, нельзя однозначно считать, что частично заполненные танки приведут к ухудшению остойчивости контейнеровоза. Это связано тем, что, например, при приеме балласта в днищевые танки ЦТ судна понижается больше, чем он же повышается из-за влияния свободной поверхности [2]. Достаточный запас метацентрической высоты современных крупнотоннажных контейнеровозов позволяет допускать такую балластировку, при которой возникает свободная поверхность без угрозы уменьшения метацентрической высоты ниже допустимого значения. При этом важно учитывать нормированное значение метацентрической высоты поврежденного судна и обеспечивать его соответствие требованиям. В качестве примера рассмотрена загрузка 3 (см. табл. 4).

Расчет остойчивости контейнеровоза М-серии, основанный на том, что ЦТ контейнера расположен в его геометрическом ЦТ, дал значение  $GM = 3,16$  м. Значение нормированной аварийной метацентрической высоты  $GM = 2,83$  м. В рассматриваемом примере принято, что ЦТ всех контейнеров был понижен на 0,5 м. По предложенной методике рассчитана  $\Delta GM$  и определена возможность уменьшения количества балласта на борту судна для поддержания  $GM \geq 2,83$  м, а также рассчитан экономический эффект.

В результате расчетов получена  $GM = 3,76$  м. Исходное количество балласта на борту составило 4602,4 т, исходная средняя осадка составила 10,7 м. С помощью грузовой программы можно в режиме реального времени изменять необходимые параметры и отслеживать изменение критериев остойчивости и параметров прочности корпуса [3], [4]. Так, при уменьшении балласта до 2284,3 т все параметры, в том числе и метацентрическая высота, остались в норме. В частности, новое значение  $GM$  составило 3,68 м. При этом определяющее значение аварийной метацентрической высоты составило 3,38 м против необходимых 3,37 м, средняя осадка уменьшилась до 10,4 м. Таким образом, удалось уменьшить количество балласта на 2318,1 т, а среднюю осадку на 30 см.

Уменьшение осадки дает больше возможностей для приведения судна к оптимальной посадке — для уменьшения расхода топлива. Определение влияния посадки судна на расход топлива — вопрос обширный и требует масштабных исследований. Однако некоторые исследования показали, что оптимальная посадка судна при определенных условиях позволяет экономить до 15 % топлива, и практически всегда — не менее чем 2 – 3 % [5].

На примере 14-дневного морского перехода крупнотоннажного контейнеровоза при среднесуточном расходе в режиме экономного плавания, равном 100 т / сут, и средней стоимости 1 т мазутного топлива марки IFO180 250 долл. США, можно получить экономию средств в размере

7000 – 10500 долл. США. При следовании с максимальной скоростью экономия может составить 14000 – 21000 долл. США при 2 – 3 % экономии соответственно.

### Заключение

Применение расчетного алгоритма показало, что установленный классификационными обществами стандарт в отношении аппликаты ЦТ контейнера обоснован, поскольку, согласно этому стандарту, получается минимальное значение расчетной метацентрической высоты. Сделан вывод о том, что фактическая аппликата ЦТ контейнера практически всегда будет меньше стандартной. Соответственно, ЦТ судна практически всегда будет расположен ниже расчетного, что приведет к увеличению значения метацентрической высоты.

Предложенный алгоритм является универсальным и позволяет выполнять оценку, используя те значения исходных параметров, которые считаются приемлемыми в конкретной ситуации. Он может использоваться совместно с системой оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК) [6] и системой определения фактического положения центра тяжести контейнера [7], что позволит в реальном времени получать фактическое значение метацентрической высоты контейнеровоза.

В ходе выполнения расчетного эксперимента показано, что современные крупнотоннажные контейнеровозы очень часто имеют повышенную метацентрическую высоту. Дополнительное понижение ЦТ судна приводит к еще большей метацентрической высоте, чрезмерное значение которой, в свою очередь, приводит к стремительной бортовой качке и негативно сказывается на самочувствии экипажа и надежности крепления палубных контейнерных штабелей, особенно их верхних ярусов.

Учет фактического положения ЦТ контейнеров позволяет оптимизировать составление грузового плана судна [8] – [10] и балластировку судна по таким критериям как минимизация неэффективного балласта, распределение балласта для обеспечения допустимых нагрузок на корпус судна и требуемая посадка [11]. Это может способствовать снижению чрезмерной метацентрической высоты и обеспечить определенный экономический эффект, основанный на снижении расхода топлива и уменьшении портовых и канальных сборов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перси Х. Д. Остойчивость морского судна (метрическая система) / Х. Дж. Перси: пер. с англ. Д. Д. Соколова. — СПб.: МОРСАР, 2007. — 198 с.
2. Царик Р. С. Влияние свободной поверхности жидких запасов на остойчивость контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Междунар. науч.-техн. конф. «Молодежь. Наука. Инновации». — Владивосток, 2016. — С. 25–31.
3. Мальцев В. А. Применение метода конечных элементов к расчету напряженно-деформированного состояния палубных перекрытий контейнеровоза / В. А. Мальцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — 6 (28). — 190–197.
4. Мальцев В. А. Программный комплекс для оценки напряженно-деформированного состояния элементов палубы контейнеровоза / В. А. Мальцев // Вестник компьютерных и информационных технологий — 2016. — № 5 (143). — С. 12–20. DOI: 10.14489/vkit.2016.05.pp.012-020.
5. Larsen N. Understanding the physics of trim: Special Greentech. Operational optimization / N. Larsen // Ship & Offshore. — 2010. — P. 36–38.
6. 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.
7. Царик Р. С. Способы определения фактической метацентрической высоты контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Междунар. науч.-техн. конф. «Молодежь. Наука. Инновации». — Владивосток, 2016. — С. 19–25.
8. Соколов С. С. Математическая модель рационального размещения груза в трюмах судна / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 3. — С. 89а–92.

9. Соколов С. С. Четырехмерная модель комплектовки груза на судне / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 75–78.

10. Соколов С. С. Моделирование размещения груза при мультимодальных перевозках / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 4. — С. 98–105.

11. Царик Р. С. Обеспечение оптимальной посадки крупнотоннажных контейнеровозов для заданных условий / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Морского государственного университета. Серия: Судовождение. — 2014. — № 67. — С. 77–83.

## EVALUATION OF INFLUENCE OF CONTAINER'S CENTER OF GRAVITY POSITION ON CONTAINER SHIP'S METACENTRIC HEIGHT

*Height of center of gravity of container is assigned by leading classification societies as half of container's height. There is a rule, being used in calculation algorithms of container ships' cargo programs, according to which, the center of gravity of container is correspond to its geometric center.*

*Practically, it is very often that actual center of gravity is mismatches with geometrical, which finally leads to change of value of metacentric height of a ship, as one of stability's criteria. As a result, ship's crew get unreliable value of metacentric height. Following ballasting and bunkering operations, based on unreliable data, may lead, at least, to unreasonable costs, or even negatively effect ship's safety.*

*In the article algorithm of evaluation of influence of container's center of gravity position on container ship's metacentric height is proposed. Task was set to determine possible position of container's center of gravity, based on actual requirements of container shipping technology, and to evaluate influence of center of gravity shifting in specified range, by experiment-calculated method, using stability program of acting modern large container ships.*

*Some alternatives of container ship loading conditions were examined: actual alternatives and modelled – containing conditions, specified in the article.*

*During calculation experiment, the results, allowing to assume, that accepted standards related to position of center of gravity of container, were obtained. It was proved that actual position of container's center of gravity, usually leads to increase of actual metacentric height of a ship, comparing to calculated one.*

*It was underlined the importance for ship's crew to have reliable value of ship's metacentric height on the stage of cargo planning for safety assuring and cost efficient management of a ship.*

*Keywords: container ships, containers, center of gravity, eccentricity, metacentric height, stability, ballasting, safety, economic efficiency.*

## REFERENCES

1. Persi, H. D. *Ostojchivost morskogo sudna (metricheskaja sistema)*. Translated by D. D. Sokolova. SPb.: MORSAR, 2007.
2. Tsarik, R. S., and D. A. Akmajkin. "Vlijanie svobodnoj poverhnosti zhidkih zapasov na ostojchivost kontejnerovoza." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Molodezh. Nauka. Innovacii»*. Vladivostok, 2016: 25–31.
3. Malcev, V. A. "The use of finite element method to calculate the stress-strain of containership deck grillage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 190–197.
4. Maltsev, V. A. "Software Complex for Calculation of the Container Ship Deck Elements Deflection State." *Herald of computer and information technologies* 5(143) (2016): 12–20. DOI: 10.14489/vkit.2016.05.pp.012-020
5. Larsen, N. "Understanding the physics of trim: Special Greentech. Operational optimization." *Ship & Offshore* 2010: 36–38.
6. Tsarik, R. S., and D. Akmajkin. "Operational control system of container ship's cargo operations (OCSCCO)." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(75) (2015): 16–23.
7. Tsarik, R. S., and D. A. Akmajkin. "Sposoby opredelenija fakticheskoj metacentricheskoj vysoty kontejnerovoza." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Molodezh. Nauka. Innovacii»*. Vladivostok, 2016: 19–25.

8. Sokolov, S. S. "Simulator for the efficient cargo stowage in the vessel holds." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2010): 89a–92.
9. Sokolov, S. S. "Four-dimensional model of cargo stowing on the ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2011): 75–78.
10. Sokolov, S. S. "Modeling of cargo placing in multimodal transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4 (2012): 98–105.
11. Tsarik, R. S., and D. A. Akmaykin. "Obespechenie optimalnoy posadki krupnotonnazhnykh konteynerovozov dlya zadannykh usloviy." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Sudovozhdenie* 67 (2014): 77–83.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Царик Руслан Станиславович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Акмайкин Денис Александрович*.  
МГУ им. адм. Г. И. Невельского  
*rex-infinity@yandex.ru*  
*Акмайкин Денис Александрович* —  
кандидат физико-математических наук, доцент.  
МГУ им. адм. Г. И. Невельского  
*akmaykin@gmail.com*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Tsarik Ruslan Stanislavovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Akmaykin Denis Aleksandrovich*.  
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy  
*rex-infinity@yandex.ru*  
*Akmaykin Denis Aleksandrovich* —  
PhD, associate professor.  
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy  
*akmaykin@gmail.com*

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80  
УДК 646.078

**Н. Н. Майоров,  
В. А. Фетисов**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ В МОРСКОМ ПАССАЖИРСКОМ ТЕРМИНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные процессы пассажирских терминалов характеризуются динамической изменчивостью, необходимостью учета разнородных параметров, критериев безопасности, анализа надежности, а также непрерывного исследования процессов обработки пассажиров. Для любого современного терминала необходимо использование инструмента для моделирования пассажирских потоков (некоторой транспортной модели) с целью получения аналитической информации, касающейся операционной деятельности для принятия решения о работе служб порта, о количестве необходимого персонала для обслуживания пассажиров, в соответствии с исходным расписанием заходов судов, о решении группы задач прогнозирования работы терминала. Объектом исследования в работе выбран Пассажирский порт Санкт-Петербурга «Морской фасад». Особую сложность вызывает выбор математической модели и практические условия внедрения транспортной модели на конкретный объект. В статье рассмотрен подход анализа операционных процессов с использованием теории надежности, приводятся условия использования графовых моделей. Качественное применение моделей теории надежности требует большого объема статистической информации о работе терминала, что является, на практике, условием ограничения использования данного подхода. Предложен метод определения потенциальных центров скопления пассажиропотоков с использованием геометрических особенностей терминала. Для исследования пассажирских потоков предложено использование логистической цепи перемещения пассажиров. В статье предложена новая логика программного инструментария, отражающего операционные процессы в морском пассажирском терминале. В логику инструмента внесены условия фиксации сбоев и задержек. Особое внимание уделено условиям применения и внедрения разработанного инструментария в реальные процессы пассажирского терминала. Рассматриваются достоинства использования подобных систем при их внедрении на начальных