

*А. И. Мишичев, А. Ю. Кукарина*

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВАЛОПРОВОДА СУДОВ БМРТ ПР. 394А

Одним из важнейших элементов конструкции судна является судовой валопровод. Он представляет собой многопролетную балку (стержень), которая работает в весьма специфических условиях, передавая крутящий момент от двигателя к винту. Судовой валопровод – это энергетический комплекс, предназначенный для передачи крутящего момента от главного двигателя к движителю. Основные элементы валопровода – это валы, главный упорный подшипник, промежуточные (опорные) подшипники, дейдвудное устройство [1]. Линейно расположенная система валов, жёстко или эластично соединённых между собой, называется линией валопровода. Вал главного двигателя соединяют с валопроводом при помощи жёстких фланцев и муфт: эластичных, гидравлических, шинно-пневматических и др.

Подшипники устанавливают на судовой фундамент или встраивают в дейдвудные устройства и кронштейны. Главный упорный подшипник служит для восприятия передаваемого валами упора и передачи его корпусу судна. Опорные подшипники являются промежуточными опорами валопровода. Опоры валопровода крепятся к корпусу судна и, следовательно, испытывают разного рода смещения и в плавании, и в доке. Кроме того, подшипники опор изнашиваются, что приводит к дополнительным перемещениям валов, изменению реакций опор и напряженно-деформированного состояния (НДС) валопровода. В связи с этим большое значение приобретает центровка валопровода, которая состоит, в частности, в наиболее рациональном расположении опор.

Дейдвудное устройство предназначено для предотвращения проникновения забортной воды внутрь корпуса судна и масла за борт, а также для смазки, охлаждения и защиты проходящего через него гребного вала. В состав дейдвудного устройства входят дейдвудная труба, подшипники, уплотнительные устройства, системы охлаждения и смазки.

На современном этапе развития науки и техники уже сложно представить проектирование изделий и конструкций без САПР. Наиболее ответственную роль среди всего многообразия САД/САМ/САЕ-программ играют пакеты конечно-элементного анализа. Круг решаемых ими задач охватывает почти все сферы инженерных расчетов: прочность, колебания, устойчивость, динамика, гидродинамика, аэродинамика и т. д.

Оценка влияния расположения опор традиционно проводится методами строительной механики с привлечением экспериментальных данных. Расчеты достаточно трудоемки и не всегда учитывают сложный характер условий работы валопровода. Развитие современных программных средств на основе метода конечных элементов (МКЭ) позволяет решать проблему взаимодействия валов, опор и элементов набора судна на уровне численных оценок влияния многочисленных факторов.

Исследования проводились с целью показать на конкретном примере возможность применения САЕ-системы Femap для анализа действия массовых сил при традиционном способе их задания. В САЕ-системе препостпроцессора Femap [2] и решателя Femap Structural был произведен расчет НДС валопровода судов БМРТ пр. 394А.

Принятая расчетная схема валопровода судов БМРТ пр. 394А представлена на рис. 1. Учтены: переменное сечение судового вала по участкам; распределенные массы от механизма изменения шага (МИШ); гидродинамический момент  $M_T = 17,56$  кНм; присоединенный к судовому валу вал редуктора и коленчатый вал двигателя. Коленчатый вал по расчетной схеме представляется пространственной рамой. Валопровод рассчитан при состоянии жесткого закрепления всех опор.

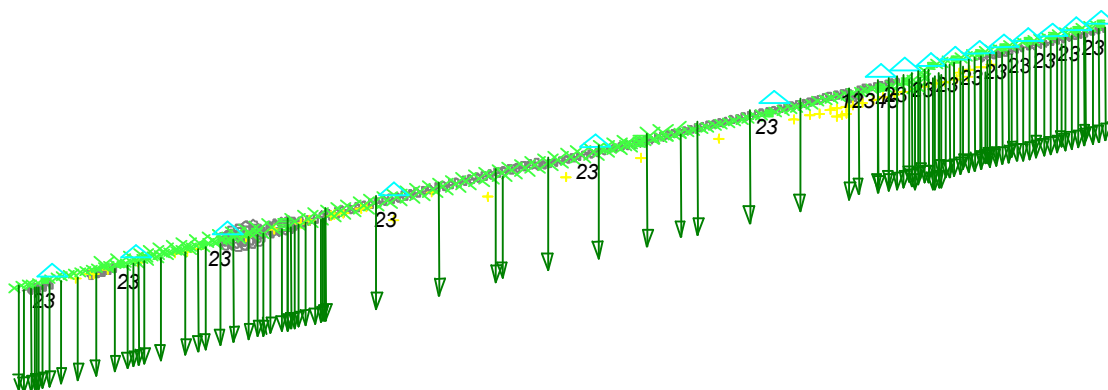
V2  
L1  
C1

Рис. 1. Принятая расчетная схема валопроводов судов БМРТ пр. 394А

Приведем некоторые данные по расчетам для рассматриваемого валопровода. Материал вала – сталь, плотность материала –  $7\,850\text{ кг/м}^3$ ; характеристики упругости: модуль Юнга –  $2,1\text{E} + 11\text{ Па}$ , коэффициент Пуассона –  $0,3$ . Тип сечения – стержень кольцевого сечения. Характерные размеры поперечных сечений валопровода приведены в таблице. При разработке конечно-элементной модели (КЭМ) использовался линейный конечный элемент типа BAR. Расчетная схема была разбита на 173 узла.

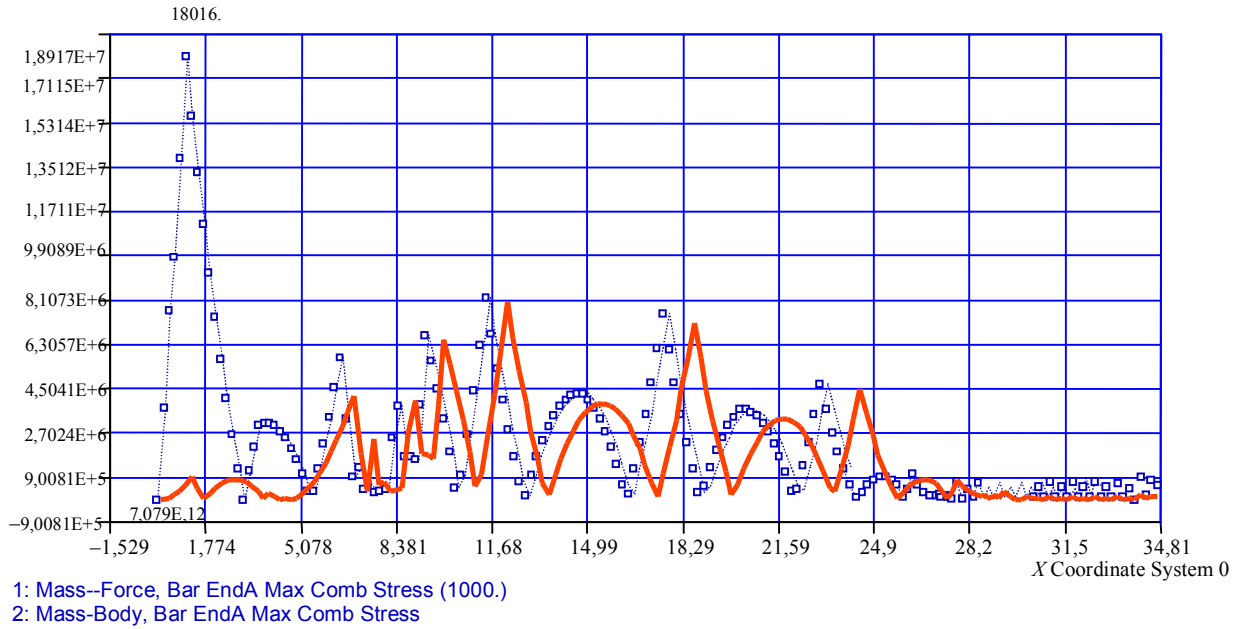
#### Размеры поперечных сечений вала

№ элемента	Площадь поперечного сечения, $\text{см}^2$	Радиус, внешний, м	Толщина стенки кольцевого сечения, м
1	0,038877	0,14	0,055
2	0,038877	0,14	0,055
3	0,15866	0,275	0,1165
4	0,24927	0,4	0,116
5	0,089457	0,21	0,085
6	0,067761	0,185	0,0725
7	0,10932	0,2375	0,0905
8	0,058198	0,175	0,065
9	0,057231	0,135	–
10	0,059371	0,1375	–
11	0,059371	0,1375	–
12	0,036628	0,108	–
13	0,034292	0,1045	–

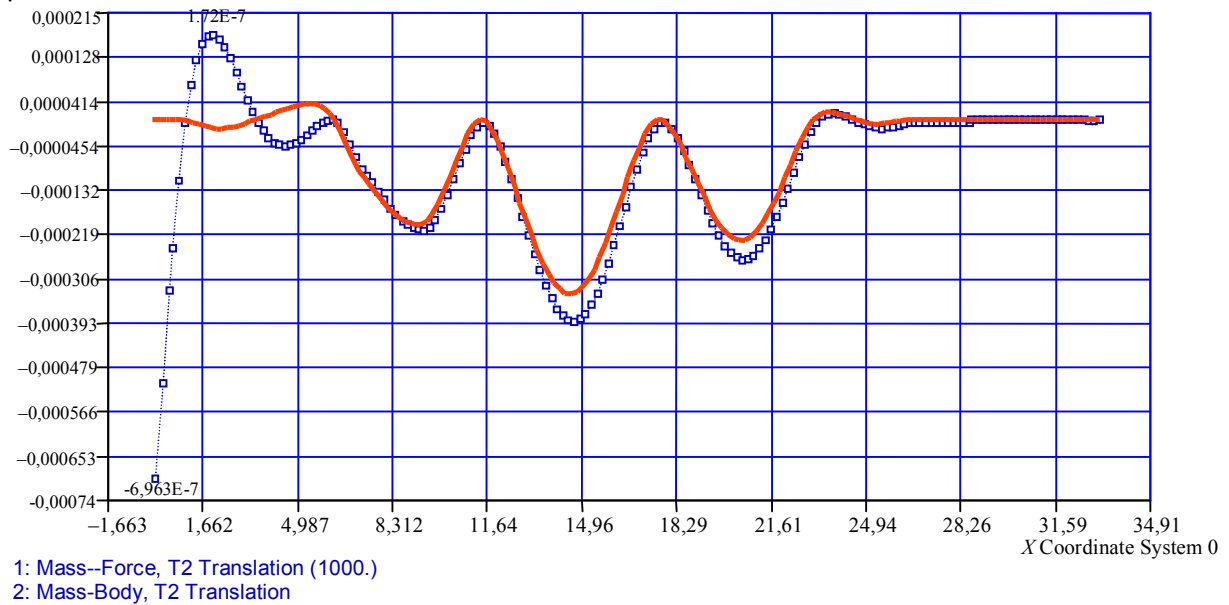
При задании граничных условий (ГУ) в соответствии с чертежом валопровода были выбраны узлы КЭ, где предполагалось установить опоры. В зоне опорного подшипника – неподвижная опора 12345, остальные – шарнирно подвижные 23; здесь цифрами обозначены запрещенные степени свободы: 1 – перемещение по оси X; 2 – перемещение по оси Y; 3 – перемещение по оси Z; цифры 4 и 5 – запрещённые вращения по осям X и Y, что и показано на рис. 1.

Расчеты МКЭ проводились с помощью САЕ-системы FEMAP-Femap Structural. Проведен статический анализ. Основными результатами являются значения реакций и НДС вала (перемещения (прогибы), максимальные изгибающие напряжения).

На рис. 2, а, б представлены графики распределения максимальных напряжений и вертикальных перемещений по длине валопровода от действия массовых сил. Верхняя кривая (с острым пиком напряжений) отражает результаты расчёта с учетом веса винта (рис. 2, а), а расположенная ниже кривая – без учета веса винта, когда валопровод испытывает лишь силу тяжести. Аналогично и для перемещений (рис. 2, б) – резкий скачок отражает результаты расчёта с учетом веса винта. При этом в одном случае, при наличии винта, нагрузки задавались традиционным способом [1], который предусматривает пересчёт масс в распределённые по длине и сосредоточенные силы. В другом случае массы задавались непосредственно путём ввода массовой плотности.



*a*



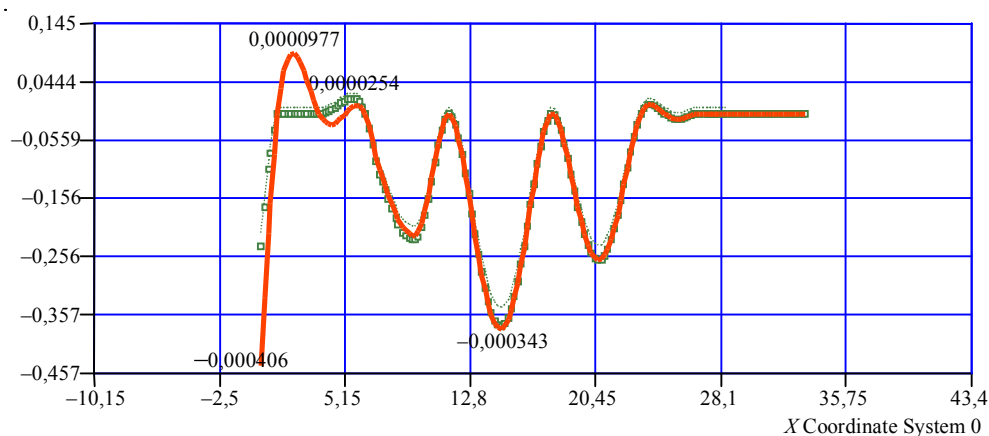
*б*

Рис. 2. Графики распределения: *a* – максимальных напряжений; *б* – вертикальных перемещений

Сравнивая полученные кривые, можно сделать следующие выводы:

- в обоих случаях результаты расчёта напряжений и перемещений практически совпадают на всём протяжении валопровода, за исключением, естественно, зоны гребного вала;
- при учете веса винта и опирания гребного вала лишь в крайних сечениях дейдвуда максимальные напряжения и перемещения возникают в гребном валу.

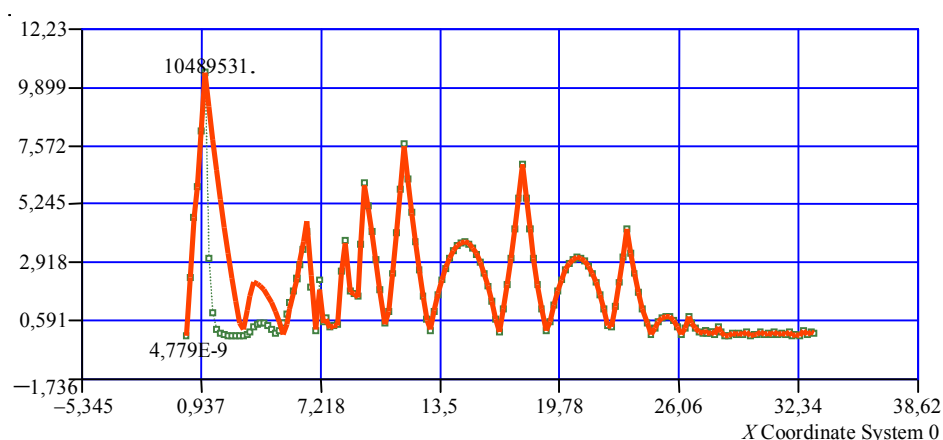
Рассмотрим теперь вариант более реалистического задания граничных условий опирания гребного вала в дейдвуде, а именно будем считать, что гребной вал опирается на дейдвудный подшипник по всей длине последнего. Для наглядности сравним этот расчёт с тем случаем, когда гребной вал опирается лишь в крайних сечениях дейдвуда. В обоих случаях учтём вес винта. Результаты статических расчётов представлены на рис. 3, *a*, *б*. Здесь, как и ранее, построены графики распределения максимальных напряжений и вертикальных перемещений по длине валопровода от действия массовых сил для упомянутых случаев задания ГУ.



1: Mass-Body DEIDVud, T2 Translation (1000.)

2: MassVint, T2 Translation (1000.)

*a*



1: Mass-Body DEIDVud, Bar EndA Max Comb Stress (0.000001)

2: MassVint, Bar EndA Max Comb Stress (0.000001)

*b*

Рис. 3. Графики распределения: *a* – вертикальных перемещений; *b* – максимальных напряжений

Кривые перемещений (рис. 3, *a*) наглядно демонстрируют эффект замены ГУ: на всём протяжении дейдвудного подшипника гребной вал имеет нулевые вертикальные перемещения, в то время как при опирании лишь в крайних сечениях дейдвуда явно виден пик перемещений.

Относительно распределения максимальных напряжений (рис. 3, *b*) можно отметить, что характер их распределения в зоне дейдвудного подшипника для рассматриваемых случаев опирания гребного вала различен, но наибольшие значения фактически совпадают.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В. В., Курылев А. С. Валопроводы рыбопромысловых судов. Ч. I. Конструкция, эксплуатация и общие вопросы проектирования. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. – 164 с.
2. FEMAP Commands v. 8.2 EDS PLM Solutions, 2002.

Статья поступила в редакцию 11.12.2006

**THE FINITE ELEMENT ANALYSIS  
OF SHAFTING DEFORMATION  
OF BMRT 394A SHIPS**

*A. I. Mishichev, A. Yu. Kukarina*

The finite-element models for ship shafting are constructed. The analyses of stress and displacement of ship shaft from mass force action are made by using the pre- and postprocessors and solver FEMAP. The diagrams of displacement and stress distribution for different models are constructed.

**Key words:** ship shafting, finite-element method, boundary conditions, loading.