

С.Н. ГИРИН, Т.А. КУЗНЕЦОВА

Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОРПУСА СУДНА ПРИ НАГРУЗКАХ, БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ

Показано, что при достижении опасных растягивающих напряжений в палубе судна не происходит мгновенного исчерпания несущей способности корпуса. Получены зависимости остаточных напряжений в днище, втором дне и в палубе от величины стрелки остаточного перегиба корпуса.

Ключевые слова: корпус судна, искривление, предельный момент, упруго-пластический расчет, остаточные напряжения.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Гирин С.Н., Кузнецова Т.А. Упругопластическое деформирование корпуса судна при нагрузках, близких к предельным. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 33–40.

УДК 629.5.021.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40

S.N. GIRIN, T.A. KUZNETSOVA

Volga State University of Water Transport, Nesterova str., 5, Nizhny Novgorod, Russia

ELASTIC PLASTIC DEFORMATION OF SHIP HULL UNDER NEAR BREAKING LOADS

It is shown that at dangerous tensile stresses in ship deck structures the hull does not fail immediately. Residual stresses in bottom, tanktop and deck structures are related to the residual hull bending.

Key words: ship hull, deformation, breaking moment, elastic plastic analysis, residual stresses.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Girin S.N., Kuznetsova T.A. Elastic plastic deformation of ship hull under near breaking loads. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 33–40 (in Russian).

UDC 629.5.021.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40

Значительное число судов внутреннего и смешанного плавания имеют искривление корпуса, происхождение которого неизвестно. Следует отметить, что практически все случаи искривления представляют деформацию перегиба. Наиболее массовый характер остаточных перегибов имеют корпуса судов типа «Волгонефть». В нашем распоряжении имеется информация, предоставленная Средне-Волжским филиалом Российского Речного Регистра (СВФ РРР), по 57 судам этого типа, имеющим такое искривление. В качестве примера в табл. 1 приводится часть имеющейся информации.

Многие специалисты полагают, что основной причиной искривления корпусов является неправильная технология выполнения ремонтных работ, когда замена листов палубы производится на плаву. В этом случае при вырезании значительного участка палубы происходит уменьшение момента инерции

корпуса и увеличение перегиба, который имеет место в состоянии нагрузки «порожнем».

Вместе с тем практика эксплуатации показывает, что корпус может получить увеличение стрелки перегиба и в межремонтный период, что хорошо видно на примере т/х «Волгонефть-24» и «Волгонефть-246»: очевидно, что материал корпуса испытывал упругопластические деформации. Одной из причин появления эксплуатационных деформаций, по мнению специалистов СВФ РРР, является нарушение судоводителями инструкции по проведению балластных операций. В соответствии с инструкцией при балластных переходах осадка носом должна быть не менее определенной величины. Для этого имеются указания о количестве принимаемого балласта и его размещении в балластных отсеках. Однако некоторые капитаны считают, что можно обеспечить установленную осадку носом при меньшем объеме



Таблица 1. Данные о некоторых судах с искривлением корпуса

Наименование судна	Проект	Год постройки	Общий перегиб, мм	Дата обследования
Волгонефть-24	558/550	1967	430	26.06.1998
			610	06.09.2002
			800	13.08.2004
Волгонефть-26	558/550	1967	500	04.07.2002
Омуль	01/07-1577/211	1969	720	01.12.2015
Волгонефть-121	550А	1975	360	30.04.2003
			270	18.07.2007
			500	26.08.2011
			270	28.10.2016
Волгонефть-246	1577	1975	450	16.12.2003
			660	24.03.2004
Волгонефть-265	1577/265-901-02	1978	430	15.03.2004
			600	20.04.2010

балласта, принимая его в носовые балластные отсеки. При этом они не вполне осознают, что такое нарушение инструкции приводит к существенному росту изгибающего момента. Выполненные расчеты показали, что в этом случае суммарное значение момента на тихой воде и дополнительного волнового момента превышает предельный момент корпуса. Например, корпус т/х «Волгонефть-217» с учетом коррозионных износов связей имеет предельный изгибающий момент при перегибе 212 МН·м. В соответствии с инструкцией по балластировке для обеспечения осадки носом в морских условиях 1,9 м необходимо принять 2646 т балласта. При этом максимальная величина изгибающего момента в корпусе для случая «порожнем с балластом» на тихой воде составляет 69,0 МН·м. При нарушении инструкции аналогичную осадку носом можно обеспечить, принимая 1240 т балласта. В этом случае максимальный изгибающий момент равен 139,3 МН·м. Дополнительный волновой изгибающий момент в классе «М» Российского Речного Регистра составляет 106,3 МН·м. Таким образом, величина расчетного изгибающего момента 245,6 МН·м превышает предельный момент корпуса примерно на 16 %. Следует отметить, что суда внутреннего и сме-

шанного плавания довольно часто попадают на волнения, при котором характеристика интенсивности волнения – высота волны трехпроцентной обеспеченности – превышает допустимую для судна волну, определяемую классом [1].

В расчетной практике считается, что превышение предельного момента сопровождается переломом корпуса. Однако процесс перелома всегда растянут по времени, а дополнительный волновой момент быстро изменяется, поэтому перелома может и не произойти, но остаточные деформации появятся.

Профессор Г.В. Бойцов исследовал упругопластические деформации корпуса т/х типа «Волгонефть» аналитическим методом с применением ряда гипотез. В настоящей работе расчеты выполнялись с помощью программного комплекса Abaqus, который предназначен для решения нелинейных задач.

Конечноэлементная схема корпуса моделировалась с помощью элементов оболочки S4R, а модель материалов корпуса, учитывающая наличие участка текучести и участка упрочнения, достаточно хорошо приближена к реальным диаграммам деформирования (рис. 1).

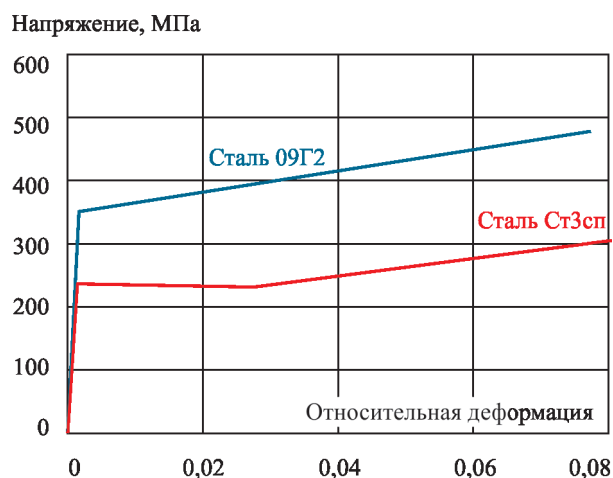


Рис. 1. Диаграммы деформирования материалов корпуса т/х типа «Волгонефть»

Выбор конечного элемента и работоспособность программного комплекса проверены на тестовой задаче упругопластического изгиба балки, для которой имеется аналитическое решение [2, с. 267]. Расхождение в величине максимального значения прогиба составило 2,9 %.

Расчетная модель корпуса представлена на рис. 2. Корпус и его нагружение предполагаются симметричными относительно миделя, поэтому расчетная модель представляет собой консольную балку, поперечное сечение которой показано на рис. 3. Узлы в плоскости симметрии имеют возможность свободного перемещения в плоскости и закреплены от перемещений, нормальных к плоскости.

Рис. 2. Конечноэлементная схема корпуса т/х «Волгонефть»

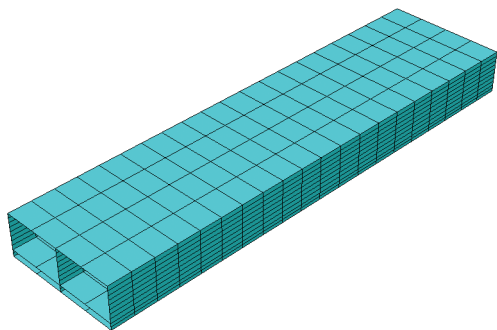


Рис. 3. Приведенные толщины обшивки и настилов в расчетной схеме корпуса т/х «Волгонефть»

Модель в плоскости бортов и диаметральной переборки загружена распределенной нагрузкой, изменяющейся по закону

$$q(x) = -\frac{4M_p \pi^2}{L^2} \cos \frac{2\pi x}{L}; \quad (1)$$

где M_p – расчетное значение момента на миделе.

При перегибе т/х «Волгонефть-217» с корпусом, имеющим коррозионный износ, но годным для эксплуатации в соответствии с Правилами Российского Речного Регистра, предел текучести материала первоначально достигается в палубе. Вместе с тем надо иметь в виду, что у стали 09Г2С, из которой изготовлена палуба, нет площадки текучести, поэтому предел текучести носит условный характер. По мере роста изгибающего момента сжимающие напряжения в днище приводят к потере устойчивости продольных ребер днища и, следовательно, к снижению приведенной толщины днища. Поскольку корпус, за исключением палубы, изготовлен из стали нормальной прочности с развитой площадкой текучести, рост деформаций в днище не сопровождается ростом напряжений. Постепенно напряжения во втором дне также достигают предела текучести, после чего происходит потеря устойчивости ребер второго дна и наблюдается резкий рост остаточного перегиба. Описанный процесс подтверждается результатами расчетов, выполненных в Abaqus (табл. 2, 3).

Таблица 2. Результаты расчетов напряжений во втором дне

Расчетные толщины днища / второго дна, мм	Напряжения, МПа					
	Упругая деформация			Упругопластическая деформация		
	палуба	днище	2 дно	палуба	днище	2-е дно
4,5/6,7	285	-250	-167	290	-235	-175
4,0/6,7	288	-261	-175	295	-235	-189
3,5/6,7	290	-273	-185	299	-235	-203
3,0/6,7	294	-285	-195	304	-235	-217
2,5/6,7	297	-299	-206	309	-235	-232
2,0/6,7	301	-314	-219	317	-235	-235
2,0/6,0	302	-327	-229	330	-235	-235
2,0/5,5	303	-338	-238	344	-235	-235
2,0/5,0	303	-349	-247	351	-235	-235
2,0/4,8	304	-353	-251	353	-235	-235

Таблица 3. Результаты расчетов перегиба во втором дне

Расчетные толщины днища / второго дна, мм	Перегиб, см		
	Упругий	Упругопластический	Остаточный
4,5/6,7	70,7	71,5	0,8
4,0/6,7	72,4	73,8	1,4
3,5/6,7	74,3	76,2	1,9
3,0/6,7	76,4	78,8	2,4
2,5/6,7	78,6	81,6	3,0
2,0/6,7	81,1	86,3	5,2
2,0/6,0	82,91	94,20	11,3
2,0/5,5	84,36	103,4	19,0
2,0/5,0	85,92	125,8	39,88
2,0/4,8	86,57	154,0	67,43

Характер деформации корпуса и поля эквивалентных напряжений в корпусе при стрелке остаточного перегиба 67,4 см показаны на рис. 4. Из рисунка следует, что в районе миделя наблюдается резкое увеличение кривизны, т.е. имеется тенденция к перелому корпуса в данном сечении.

На рис. 5 показаны зависимости остаточных напряжений в связях палубы, днища и второго дна от величины остаточного перегиба корпуса. Из графиков следует, что при достижении остаточным пере-

гибом величины примерно 40 см дальнейший рост остаточных перегибов практически не сопровождается ростом остаточных напряжений.

На рис. 6–8 показано распределение напряжений по высоте наиболее нагруженного сечения (на миделе) при достижении остаточного перегиба 67,4 см. Некоторая нелинейность распределения напряжений по высоте при упругом деформировании материала объясняется особенностями программного комплекса по вычислению среднего напряжения в узле.

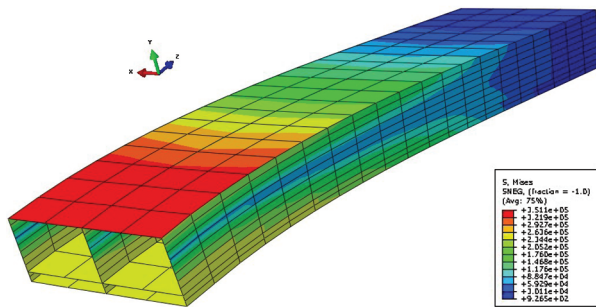


Рис. 4. Поля эквивалентных напряжений упругопластического расчета корпуса т/х «Волгонефть»

Остаточные напряжения, МПа

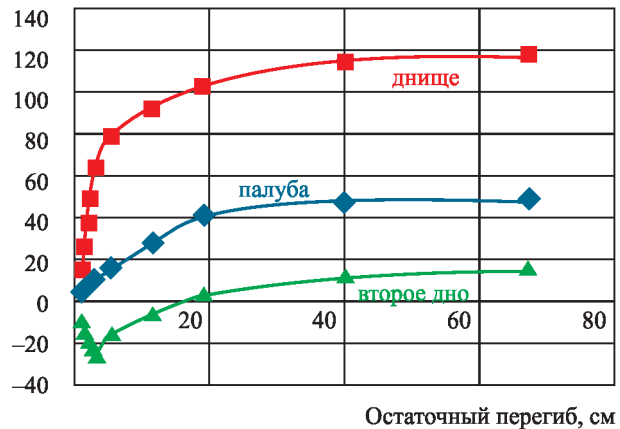


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений от остаточного перегиба корпуса т/х «Волгонефть»

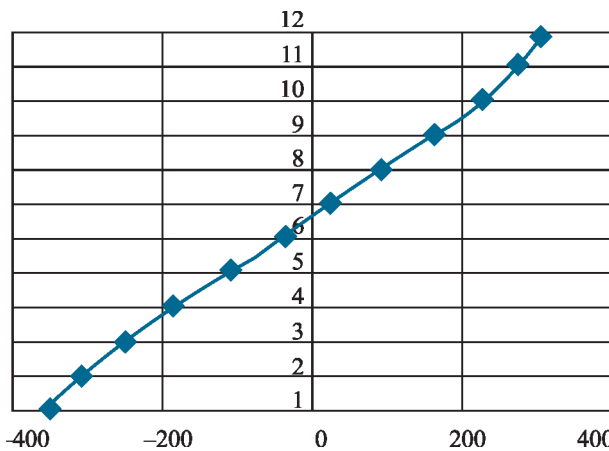


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения корпуса т/х «Волгонефть» при упругой работе материала

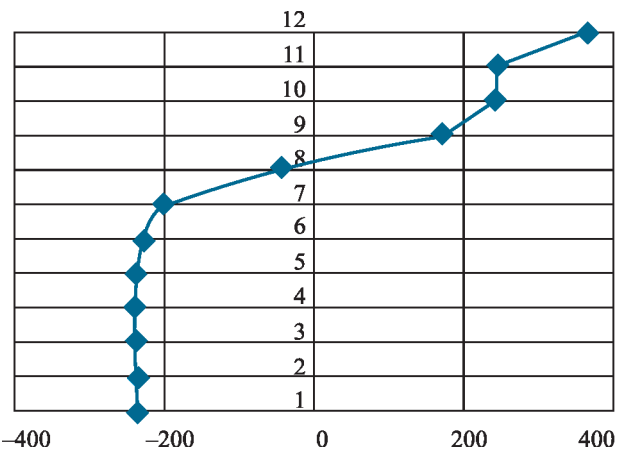


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения т/х «Волгонефть» при упругопластической работе материала

Очевидно, что при дальнейшем снижении приведенной толщины второго дна стрелка перегиба устремляется в бесконечность, что означает перелом корпуса судна. При статическом нагружении корпуса рассматриваемой нагрузкой такой перелом неизбежен.

Выше произведен анализ упругопластического изгиба т/х «Волгонефть-217», у которого опасные напряжения 257,0 МПа в палубе и 211,5 МПа в днище достигаются одновременно при одной и той же вели-

чине предельного изгибающего момента 212 МН·м. При этом палуба изготовлена из стали 09Г2С, а днище – из стали Ст3сп. Некоторые суда типа «Волгонефть» имеют корпуса, изготовленные целиком из стали 09Г2С. Выполним анализ для такого корпуса с остаточными толщинами, характерными для корпуса т/х «Волгонефть-217».

Формально, в соответствии с Правилами Речного Регистра, такой корпус будет иметь то же значение предельного изгибающего момента 212 МН·м.

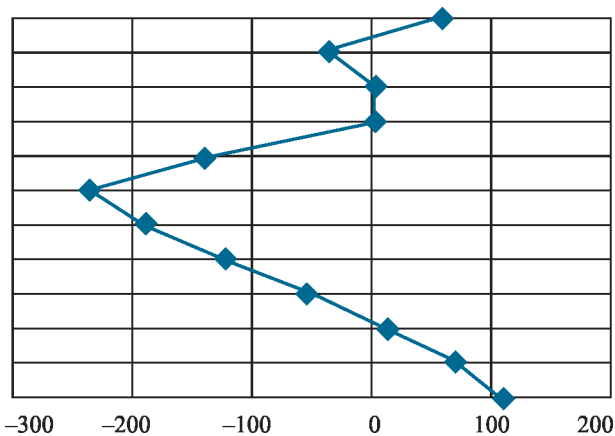


Рис. 8. Распределение остаточных нормальных напряжений по высоте сечения т/х «Волгонефть»

Из представленного выше анализа следует, что сколько-нибудь значимые величины остаточных перегибов корпус может получить, если сжимающие напряжения в днище достигают предела текучести, при кото-

рых продольные ребра днища теряют устойчивость. Для рассмотренного случая величина изгибающего момента, при котором напряжения в днище достигают 235 МПа, равна 245,6 МН·м. Если корпус целиком изготовлен из стали 09Г2С, то достижение в днище сжимающего напряжения, равного пределу текучести 350 МПа, происходит при величине изгибающего момента 343,8 МН·м, что на 40 % превышает величину аналогичного момента для корпуса, изготовленного из стали нормальной прочности (за исключением палубы).

Результаты расчета с использованием программного комплекса Abaqus представлены в табл. 4, 5 и на рис. 9–12.

Полученные результаты показывают, что при деформации перегиба корпуса судна с двойным дном, когда опасные напряжения возникают в палубе, достижение изгибающим моментом в сечении величины предельного момента и даже некоторое превышение этой величины не приводит к перелому корпуса,

Таблица 4. Результаты расчета напряжений с использованием программного комплекса Abaqus

Расчетные толщины днища / второго дна, мм	Напряжения, МПа					
	Упругая деформация			Упругопластическая деформация		
	палуба	днище	2 дно	палуба	днище	2-е дно
5,1/6,7	413,4	-350,2	-230,2	361,0	-359,0	-264,6
4,5/6,7	417,5	-367,0	-243,9	362,0	-359,9	-297,6
4,0/6,7	423,8	-385,3	-257,1	363,9	-361,0	-327,5
3,5/6,7	425,5	-400,7	-270,5	365,7	-362,4	-354,7
3,5/6,5	425,6	-404,0	-273,3	366,5	-363,1	-357,8
3,5/6,0	426,1	-414,3	-282,0	370,1	-367,3	-362,2

Таблица 5. Результаты расчета перегиба с использованием программного комплекса Abaqus

Расчетные толщины днища / второго дна, мм	Перегиб, см		
	Упругий	Упругопластический	Остаточный
5,1/6,7	99,9	124,3	24,4
4,5/6,7	102,6	134,5	31,9
4,0/6,7	105,1	145,1	40,0
3,5/6,7	107,8	157,7	49,9
3,5/6,5	108,2	161,8	53,6
3,5/6,0	109,6	181,2	71,6

однако появляются остаточные деформации в виде искривления корпуса и остаточные напряжения. Значительные величины стрелок общего перегиба корпуса возможны только тогда, когда продольные холостые балки днища теряют устойчивость. Следовательно, при оценке технического состояния корпуса необходимо с особой серьезностью подходить к дефектации связей двойного дна и рассматривать критические напряжения продольных холостых балок в качестве опасных при вычислении предельного момента корпуса судна.

Сделанное заключение подтверждается результатами освидетельствования корпусов судов типа «Волгонефть», выполненного экспертами СВФ РРР, где отмечается: «При освидетельствовании конструкций корпусов, имеющих остаточный перегиб, были зафиксированы деформации днищевых обшивок совместно с набором от 20 до 80 мм. Деформированные конструкции имеют коррозионный износ с потерей устойчивости вертикальных стоек, соединяющих ребра жесткости днища и второго дна».

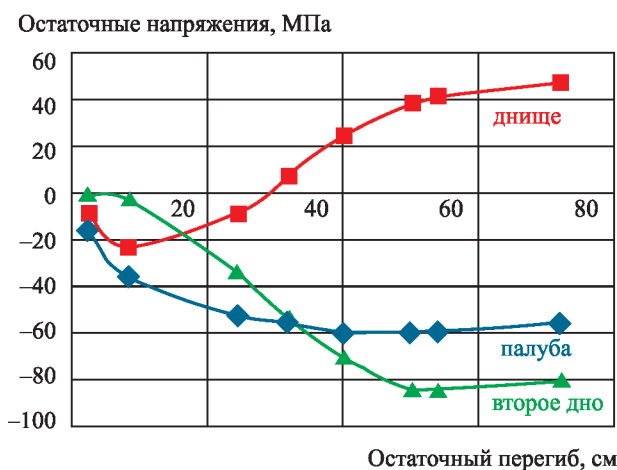


Рис. 9. Зависимость остаточных напряжений от остаточного перегиба корпуса т/х «Волгонефть» (корпус изготовлен из стали 09Г2С)

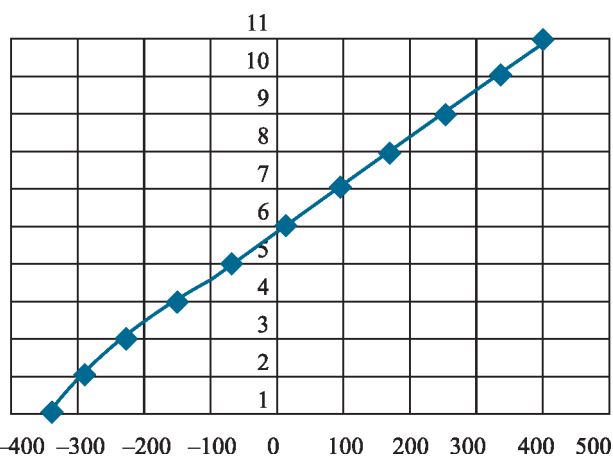


Рис. 10. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения корпуса т/х «Волгонефть» при упругой работе материала, МПа (корпус изготовлен из стали 09Г2С)

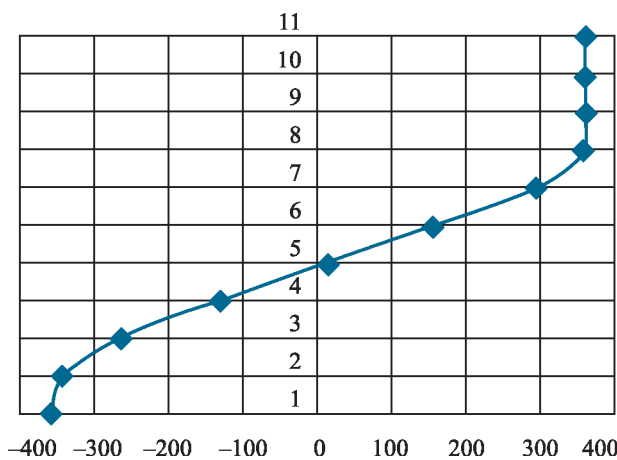


Рис. 11. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения корпуса т/х «Волгонефть» при упругопластической работе материала, МПа (корпус изготовлен из стали 09Г2С)

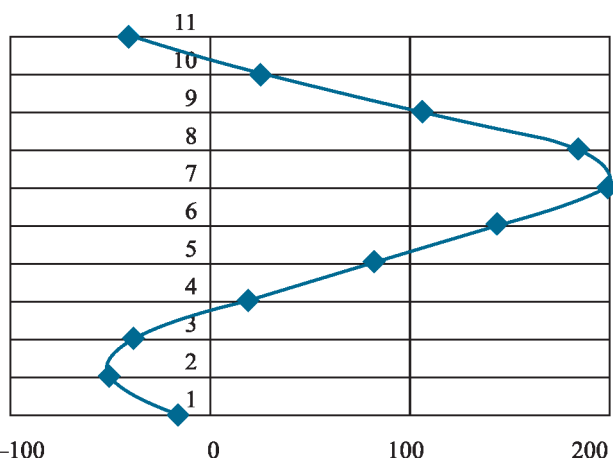


Рис. 12. Распределение остаточных нормальных напряжений по высоте сечения корпуса т/х «Волгонефть», МПа (корпус изготовлен из стали 09Г2С)

Библиографический список

1. *Гирин С.Н.* О контроле прочности судов смешанного плавания // Судостроение. 2001. № 1. С. 14–17.
2. *Давыдов В.В.* и др. Прочность судов внутреннего плавания. Справочник. М.: Транспорт, 1978.

Кузнецова Татьяна Александровна, к.т.н., старший преподаватель кафедры теории конструирования инженерных сооружений ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». Телефон: +7 (831) 419-78-67. E-mail: smk@vgavt-nn.ru.

Сведения об авторах

Гирин Станислав Николаевич, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». Адрес: 603951, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. Телефон: +7 (831) 419-78-67. E-mail: smk@vgavt-nn.ru.

Поступила / Received: 06.03.18

Принята в печать / Accepted: 03.05.18

© Коллектив авторов, 2018