

УДК 629.12:539.3

В.Д. Вешуткин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РАЗБОРНОГО ПОНТОНА ПЛАВУЧЕЙ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ НА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментального исследования напряженного состояния узла соединения отдельных блоков блочно-разборного понтона плавучей буровой установки (ПБУ). Исследование проводилось на тензометрической модели, изготовленной из органического стекла. Для определения максимальных напряжений в узле предлагается эмпирическая формула. По масштабам подобия результаты пересчитываются на натурное соединение.

Ключевые слова: напряженное состояние, тензометрическая модель, органическое стекло, понтон, плавучая буровая установка, тензорезисторы.

Освоение запасов нефти и газа под дном крупных озер Среднего Приобья ставит задачу создания плавучих оснований под буровое оборудование. Обеспечение требований, предъявляемых к плавучему основанию условиями Западной Сибири, приводит к необходимости создания разборных ПБУ, приспособленных для транспортировки в условиях бездорожья. Соединение отдельных блоков между собой должно производиться просто, без применения сложного оборудования и в любых климатических условиях.

При проектировании плавучих буровых оснований, состоящих из отдельных элементов, важно обеспечить общую продольную и поперечную прочность. Существующие методы расчета общей прочности, применяемые для судов внутреннего плавания, нельзя применить для мелкосидящей ПБУ с соотношением главных размерений $\frac{L}{H} = 26,3 > 22$,

$\frac{B}{H} = 24,4 > 5$ для судов технического флота класса «Р». Так как указанные соотношения выходят за регламентируемые Речным Регистром пределы. Корпуса блоков ПБУ соединяются в отдельных точках. Узлы соединения понтонов должны обеспечить общую продольную и поперечную прочность и надежность ПБУ. От работоспособности узла полностью зависит работа плавучего бурового основания.

Нагрузка может носить знакопеременный характер. Наиболее опасным случаем нагружения является продольное растяжение узла. В условиях изменяющихся нагрузок, низких температур, высокой концентрации напряжений в узле, обусловленной как конструктивными, так и технологическими факторами, возможно появление хрупких разрушений.

Перед экспериментальным исследованием прочности корпуса платформы и узла соединения блоков ставились задачи:

- определение характера распределения и величин нормальных напряжений в связях корпуса при различных положениях буровых вышек;
- определение упругих линий корпуса основания при различных положениях буровых;
- определение необходимого количества соединительных элементов в различных сечениях корпуса ПБУ;
- определение напряженно-деформированного состояния примыкающего к пазу участка палубы в районе гайки стяжного соединения;
- определение максимальных величин нормальных напряжений, действующих в узле, и пересчет их на натурное соединение.

Для исследования были разработаны и изготовлены тензометрические модели из ор-

ганического стекла платформы и узла соединения понтонов между собой. Натурные плавучие платформы (базовая и предложенная), а также их тензометрические модели имели главные размерения и характеристики, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Основные размеры натуральных платформ и тензометрических моделей

Характеристика	Натура (предлагаемая)		Модель		Масштаб $\bar{\lambda}$
	Обозначение	Размер	Обозначение	Размер	
Длина расчетная, м	L_n	36,0 (42)	L_m	1,20 (1,4)	30
Ширина расчетная, м	B_n	39,0	B_m	1,30	30
Высота борта, м	H_n	1,6	H_m	0,059	30
Осадка расчетная, м	T_n	0,59	T_m	-	-
Водоизмещение, т	D_n	888	D_m	-	-
Клиренс, м	b_n	3,0	b_m	0,10	30
Размеры отдельного понтона					
Длина, м	L_{nn}	18,0	L_{nm}	0,600	30
Ширина, м	B_{nn}	5,97	B_{nm}	0,200	29,9
Высота, м	H_{nn}	1,6	H_{nm}	0,059	30
Количество понтонов, шт.	n_n	12 (14)	n_m	12 (14)	1

Примечание: без скобок указаны размеры базовой платформы, а в скобках - предложенной

Тензометрические модели ПБУ выполнены условно-конструктивно подобными по отношению к натурному судну [3]. В моделях осуществлен основной набор корпуса (флоры, кильсоны, карлингсы, рамные бимсы и рамные шпангоуты борта), легкие продольные балки днища. Шпангоуты и холостые бимсы не устанавливались. Легкие продольные балки палубы для упрощения технологии сборки модели устанавливались на палубе сверху. Продольные и поперечные фермы корпуса заменялись переборками с вырезами. Соединение отдельных блоков модели между собой для базовой модели осуществлялось вертикальной полосой в местах установки разъемных соединителей. В предлагаемом варианте конструкции ПБУ соединение выполнялось полосой по всей ширине понтона, установленной по палубе и днищу, так как был предложен новый способ быстроразъемного соединения.

Таблица 2

Основные толщины связей платформ и тензометрических моделей

Наименование связей	Толщина натурального судна, мм			Толщина модели, мм	Масштаб подобия толщин $\bar{\tau}$
	Пластина	Набор	Приведенная		
Днище	8,0	0,7	8,7	3,0	2,9
Палуба	6,0	-	6,0	2,0	3,0
Борт	4,0	-	4,0	1,5	2,7
Поперечные переборки	4,0	-	4,0	1,5	2,7
Транцы	8,0	-	8,0	2,5	3,2
Верхний пояс моста	24,0	0,2	24,2	8,0	3,0
Нижний пояс моста	24,0	0,2	24,2	8,0	3,0
Стенки моста	10,0	-	10,0	3,0	3,3
Среднее значение $\bar{\tau}$					3,0

В соответствии с методикой моделирования [3], принято два масштаба геометрического моделирования:

- масштаб подобия габаритных размеров $\bar{\lambda} = \frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \frac{H_n}{H_m} = 30$;
- масштаб подобия толщин связей $\bar{\tau} = \frac{t_n}{t_m} = 3,0$.

Масштаб габаритных размеров указан в табл. 1, а масштаб толщин связей – в табл. 2.

Масштаб подобия упругих свойств материала $\bar{\varepsilon} = \frac{E_n}{E_m} = \frac{2,0 \cdot 10^5}{2,33 \cdot 10^3} \approx 90$,

где $E_n = 2,0 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали, $E_m = 2,33 \cdot 10^3$ МПа – модуль упругости органического стекла. Для тонкостенных конструкций геометрические характеристики сечения линейно зависят от толщины связей. Кильсоны, карлингсы, легкие балки палубы, флоры и бимсы смоделированы по площади с масштабом $\bar{\lambda} \cdot \bar{\tau}$, шпангоуты и стойки транцевых переборок по моменту инерции с масштабом $\bar{\lambda}^3 \cdot \bar{\tau}$.

Схема формирования платформы из блоков приведена на рис. 1 в базовом и на рис. 2 – в предложенном варианте соединения блоков. В предложенном варианте узлы соединения блоков между собой расположены в районах с меньшими значениями изгибающих моментов. Для дальнейшего снижения действующих нормальных напряжений рекомендуется установить дополнительный соединительный мост на миделе платформы. Дополнительная масса конструкций компенсируется дополнительными силами поддержания за счет установки дополнительных блоков (понтонных).

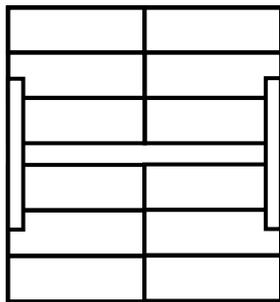


Рис. 1. Схема расположения блоков для базового варианта

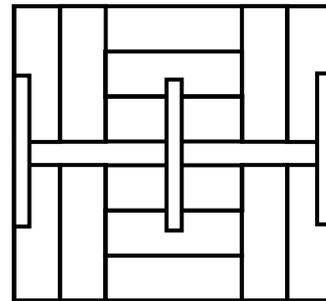


Рис. 2. Схема расположения блоков для предложенного варианта

Исследовалось напряженное состояние корпуса от сил веса буровых вышек при их различном положении относительно миделя судна. В состав подвижных грузов были включены статьи нагрузки (табл. 3).

Таблица 3

Массы, включенные в состав перемещаемых грузов

Наименование статей нагрузки	Масса, т	Плечи, м		Моменты, тм	
		x	y	M_y	M_x
Вышечно-лебедочный блок	226	0	0,58	0	130
Лестницы и площадки	5,0	0	0	0	0
Тележки	60	0	0	0	0
Суммы	291	0	0	0	130

Для пересчета нагрузки с природы на модель были приняты следующие значения: $P_n=291$ т, $y_n=0,44$ м. Для моделирования сил поддержания со стороны воды использовалась подушка из пенополиуретана (поролон). График просадки поролон под действием давления приведен на рис. 3. Для определения прогибов в различных точках модели устанавливались рейки с милли-

метровыми делениями. Схема расстановки реек показана на рис. 4. Перемещения точек модели фиксировались с помощью нивелира. В кружках на схеме указаны номера реек.

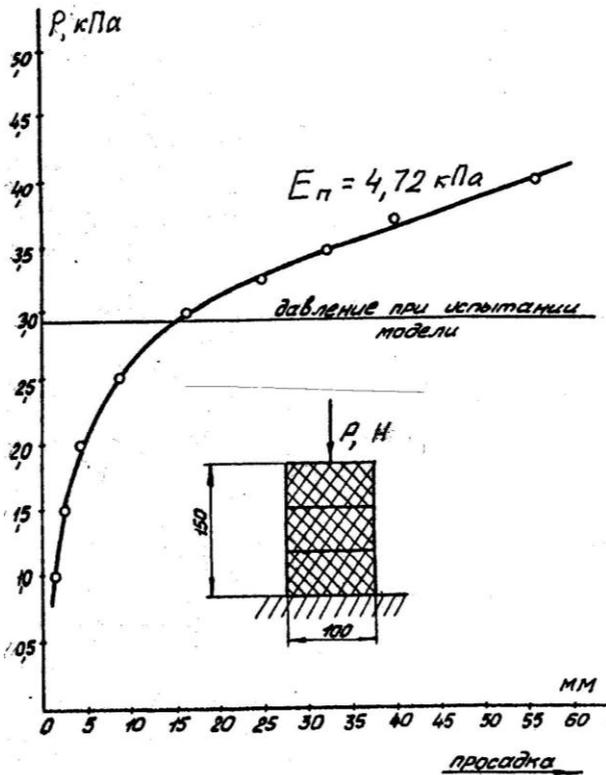


Рис. 3. График просадки поролона

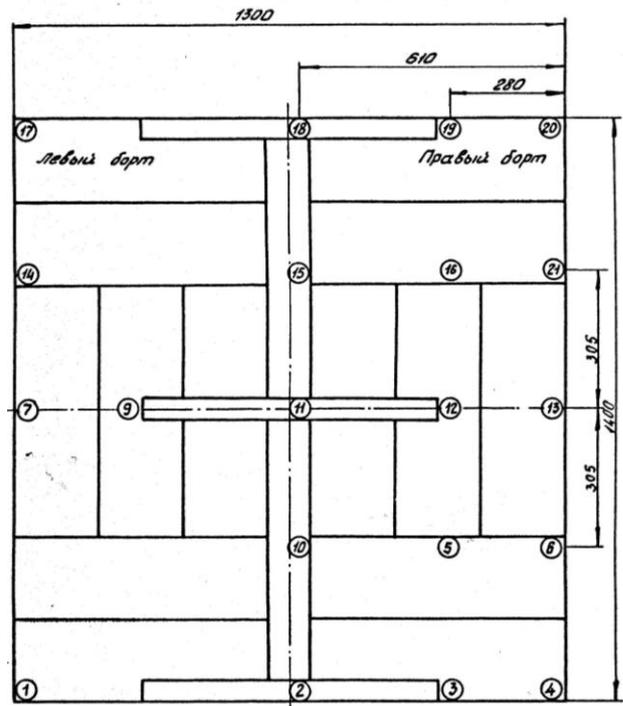


Рис. 4. Схема установки реек для определения прогибов

Для экспериментального исследования разъемного соединения узла для стяжки блоков была спроектирована и изготовлена геометрически подобная тензометрическая модель из органического стекла толщиной 1,5 и 3 мм в масштабе $\lambda = 2,7$. Модель состояла из части цилиндрического паза, приклеенных в его плоскости листов, имитирующих транец понтона и поперечной диафрагмы (перпендикулярно пазу), имитирующей палубу понтона.

Конструкция натурального соединения блочно-разборного понтона ПБУ показана на рис. 5, конструкция модели узла – на рис.6. Детали склеивались между собой клеем на основе смолы СММ-1. Тензометрическая модель узла испытывалась в специальном стенде, в котором она устанавливалась на две роликовые опоры (рис. 7). Нагружение модели осуществлялось путем подвешивания калиброванных грузов к стержню, имитирующему стяжку. Нагрузка прикладывалась ступенями по 5 кг до максимальной величины 20 кг.

Перед каждой серией испытаний модель подвергалась двукратному приложению нагрузки, на 10% превышающей максимальную испытательную нагрузку с целью приработки приборов. Деформации элементов модели измерялись методами тензометрии. Проволочные тензорезисторы (ТР) имели базу 5 мм и начальное сопротивление 100 Ом. Они наклеивались на предварительно подготовленную поверхность клеем на циакриновой основе. Схема размещения ТР на модели узла приведена на рис. 8. Для измерения деформаций использовался цифровой измерительный тензометрический мост ИТЦ-03-32. Коэффициент тензочувствительности ТР равен $S=2,07$ с погрешностью $\delta=1,7\%$.

Деформации элемента конструкции в месте установки ТР для всех моделей по его направлению определялись по формуле $\epsilon = \Delta N \cdot C_\epsilon$, где $\Delta N = N_i - N_0$ разность показаний прибора при текущей и нулевой нагрузке, где C_ϵ коэффициент, полученный при градуировке ТР. Схема размещения ТР на модели ПБУ (предложенный вариант) приведена на рис. 9.

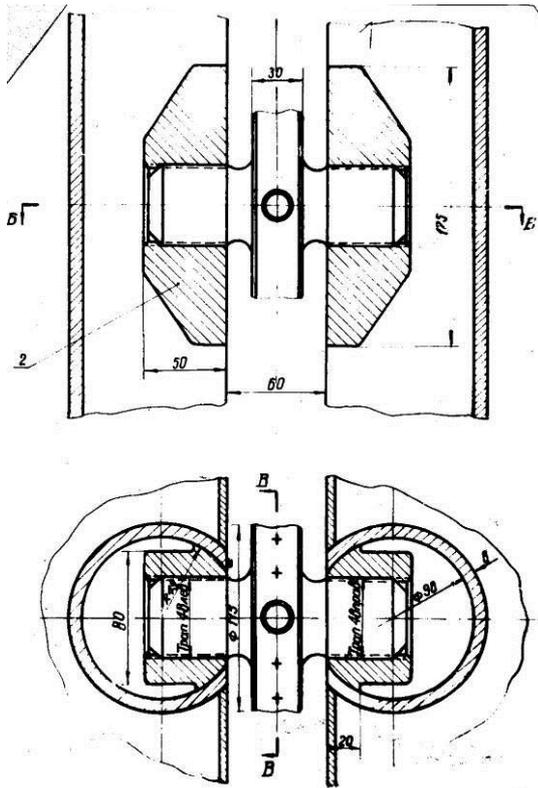


Рис. 5. Конструкция натурального узла

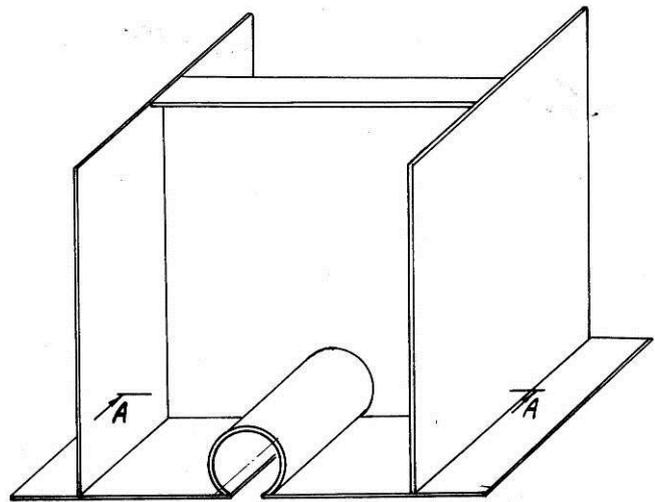


Рис. 6. Конструкция модели узла

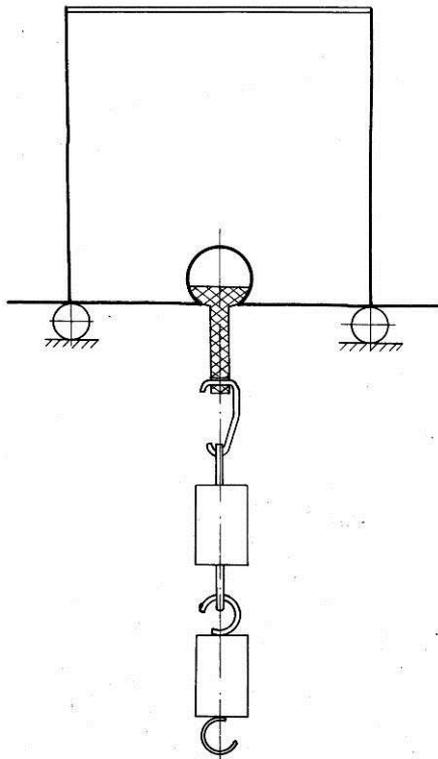


Рис. 7. Схема нагружения модели узла

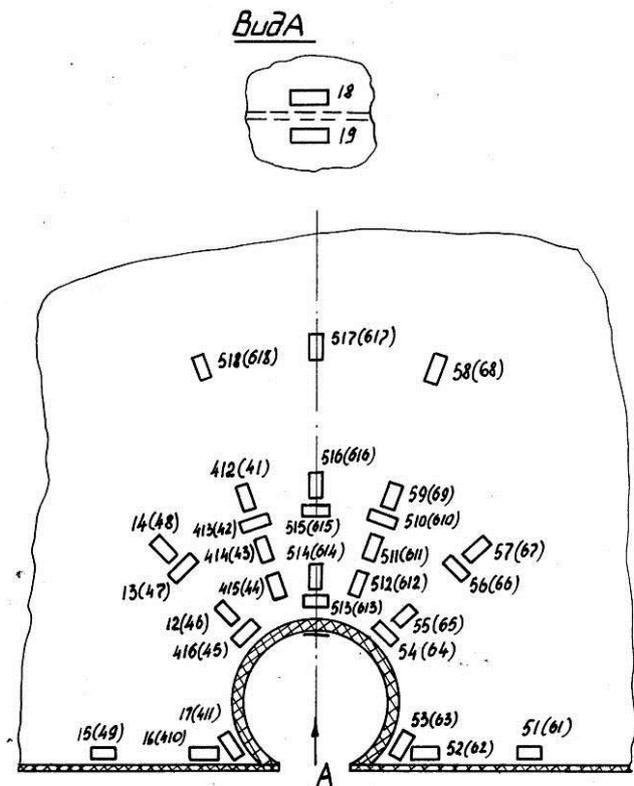


Рис. 8. Схема размещения ТР на модели узла

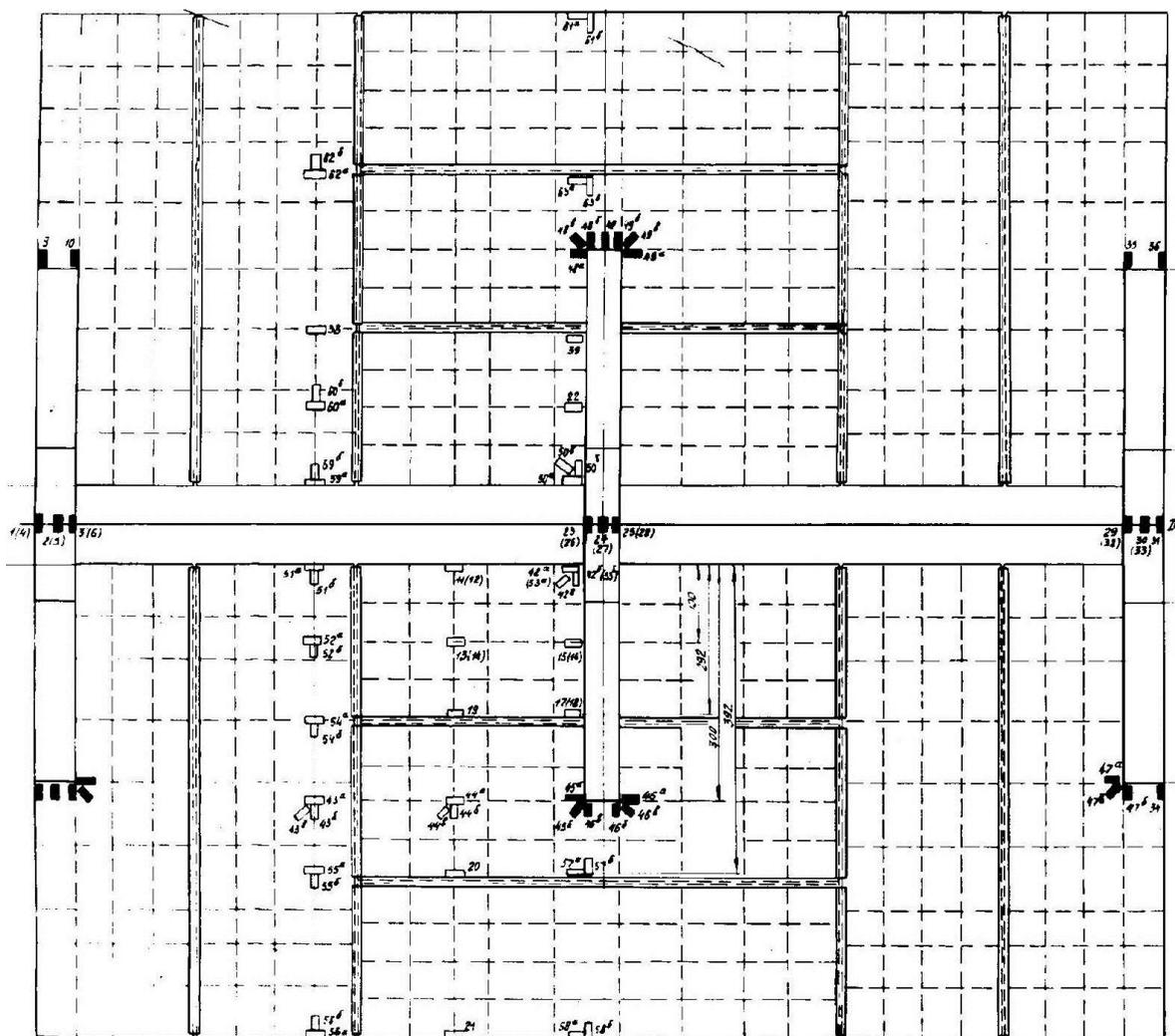


Рис. 9. Схема размещения ТР на модели ПБУ (предложенный вариант)

Нагрузка на модели ПБУ прикладывалась в соответствии с рис.10, 11. На рис.10 показано симметричное нагружение от массовых нагрузок бурильных вышек, а на рис. 11 – несимметричное нагружение.

По полученным значениям напряжений для модели узла построены эпюры в радиальном и окружном направлениях, которые приведены на рис. 12 и рис. 13.

По результатам испытаний модели ПБУ построены эпюры прогибов модели для всех случаев нагружения, а также получены величины нормальных и касательных напряжений. На основании анализа распределения нормальных напряжений по длине и ширине палубы при различном положении буровых вышек можно заключить:

- влияние несимметричности нагрузки сказывается незначительно; характер распределения нормальных напряжений для обоих случаев практически совпадает;
- поперечные нормальные напряжения достигают максимума в верхнем пояске среднего соединительного моста (5,9 МПа); при пересчете на натурное судно получим 105 МПа, где масштаб силового подобия равен $\bar{\rho} = 1600$;
- одной из наиболее нагруженных деталей в ПБУ является кница нижней части соединительного моста в которой максимальные напряжения достигают величины 101 МПа;
- характер упругих линий напоминает характер изгиба пластин соединенных перемышками.

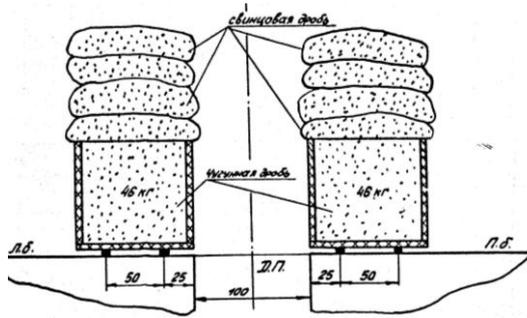


Рис. 10. Симметричное нагружение модели ПБУ

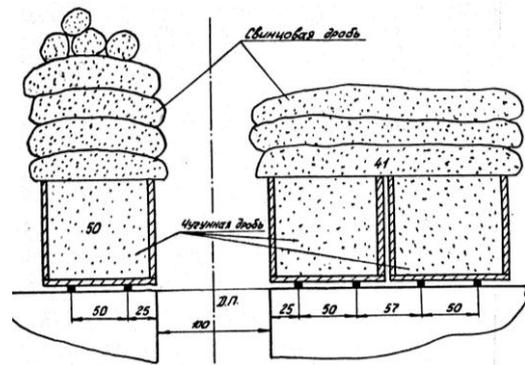


Рис. 11. Несимметричное нагружение модели ПБУ

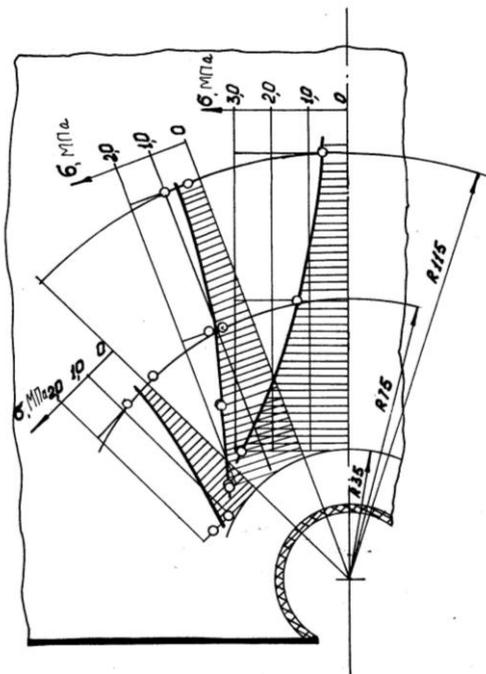


Рис. 12. Распределение нормальных радиальных напряжений по радиальному направлению

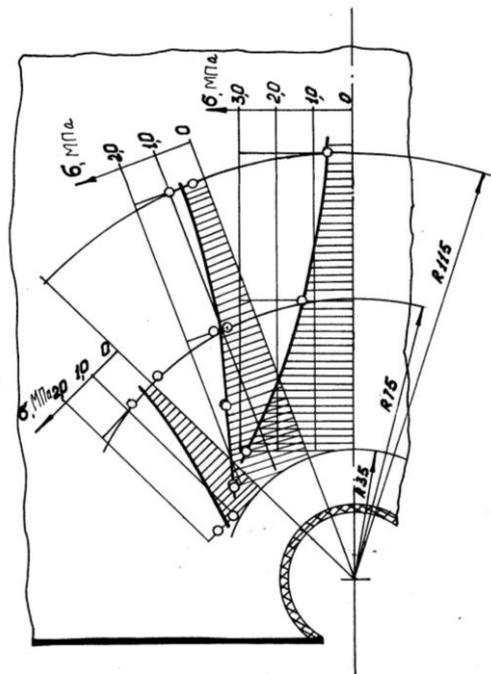


Рис. 13. Распределение нормальных радиальных напряжений по круговому направлению

Ранее было определено максимальное усилие, действующее на соединение и равное $T_n=270$ кН. Масштаб силового подобия в этом случае будет равен

$$\bar{\rho} = \frac{T_n}{T_m} = \frac{270}{0,175} = 1550,$$

где $T_m=0,175$ кН нагрузка при испытаниях модели. Нормальные напряжения пересчитываются по формуле

$$\sigma_n = \sigma_m \frac{\bar{\rho}}{\lambda^2} = \sigma_m \frac{1550}{2,7^2} = 210 \cdot \sigma_m.$$

Максимальная величина нормальных напряжений в наиболее нагруженной точке составит

$$\sigma_n = 210 \cdot 2,84 = 596 \text{ МПа.}$$

Напряжения в палубе у паза будут несколько выше замеренных напряжений. Если воспользоваться правилом «угла 30°», а силу условно приложить в точке пересечения плоскости палубы с осью паза, тогда можно получить простую расчетную формулу в точках, лежащих на линии действия силы (рис. 7)

$$\sigma_B = \frac{P}{2r \cdot \operatorname{tg} 30^\circ \cdot \delta} = \frac{P}{1,15 \cdot r \cdot \delta}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на соединение; r – расстояние от центра паза до точки определения напряжений; δ – толщина обшивки.

Сравнение напряжений, вычисленных по предлагаемой формуле, с экспериментальными значениями выполнено в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Нормальные напряжения σ , МПа	r , мм		
	35	75	115
Экспериментальные	2,84	1,34	0,62
Теоретические	2,90	1,35	0,78
Расхождение, %	2,1	0,8	26

При расчете по формуле (1) максимальные нормальные напряжения в узле будут составлять

$$\sigma_{\max} = \frac{270 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 0,06 \cdot 0,006} = 655 \text{ МПа},$$

где $r=6,0 \text{ см}=0,06 \text{ м}$; $\delta=6 \text{ мм}=0,006 \text{ м}$; $P=270 \text{ кН}$.

При пределе текучести стали равном $\sigma_T=235 \text{ МПа}$ необходимо усиление конструкции. Это может быть осуществлено либо увеличением толщины листа, либо снижением нагрузки, приходящейся на соединение. При невозможности снижения нагрузки необходимо толщину прилегающего листа увеличить до толщины

$$\delta = \frac{270 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 0,06 \cdot 190} = 655 = 0,0206 \text{ м} = 20,6 \text{ мм} \cong 22 \text{ мм}.$$

По результатам работы можно сделать выводы:

- работа узла соединения блоков носит сложный характер;
- для предварительных расчетов напряжений в узле можно пользоваться формулой (1);
- толщину палубы и днища в районе дискретных соединений необходимо увеличить до значений 22–24 мм;
- необходимы дальнейшие исследования прочности и надежности узла соединения как при статических, так и при переменных нагрузках, для оценки его надежности и долговечности, так как надежность узла влияет на надежность и работоспособность плавучего основания в целом (особенно при пониженных температурах).

Библиографический список

1. Дорюфеев, Б.А. Предварительные результаты проектирования опытной установки для разбуривания кустов скважин на озерных площадях / Б.А. Дорюфеев, В.К. Борисенко, А.Н. Воевода // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1973. Вып. 17.
2. Дорюфеев, Б.А. динамический расчет плавучего свайного основания буровой установки / Б.А. Дорюфеев [и др.] // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1974. Вып. 21.

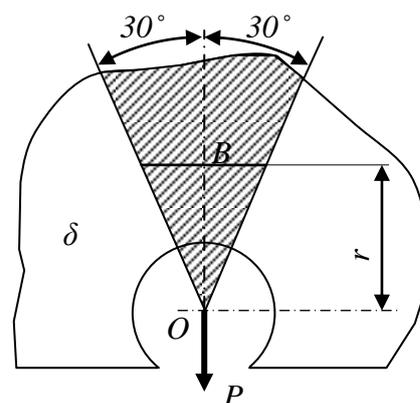


Рис. 14. Условное теоретическое распределение нормальных напряжений

3. **Перлин, А.А.** Исследование прочности судовых конструкций на тензометрических моделях / А.А. Перлин, М.К. Шалкин, Ю.К. Хрящев. – Л.: Судостроение, 1967.
4. **Российский Речной Регистр.** Правила классификации и постройки судов внутреннего и смешанного плавания. М., 2008. Т. 1, 2.
5. **Давыдов, В.В.** Прочность судов внутреннего плавания: справочник / В.В. Давыдов [и др.]. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

V.D. Veshutkin

STUDY OF STRESS STATE CONNECTION UNIT BLOCK-MADE PONTOON FLOATING DRILLING PLATFORM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

The results of the pilot study the stress state of the pontoons AR collected from individual units, adjusted for transportation and assembly combination of these individual units. The study was conducted on strain-gauge models made of Plexiglas. AR models were manufactured in two versions floating base formation. According to the results of the pilot study conclusions about the nature of the elastic base lines and the distribution of normal stresses in the base and the bridge deck. To investigate the connection node block was made such a strain gauge model. To determine the maximum stress in the node is proposed empirical formula. The scale of the similarity results are translated to full-scale connection.

Key words: stress, strain gauge model, organic glass, pontoon, floating drilling rig, strain gages.