

628.12  
13-57

Министерство высшего, среднего специального и профессионального образования Б С С Р.

Белорусский технологический институт имени С.М.Кирова.

630<sup>4</sup>378.34

С.А. В Л А Д И М И Р О В.

УСИЛИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ТАКЕЛАЖНЫХ КРЕПЛЕНИЯХ РЕЧНЫХ  
СЕКЦИОННЫХ ПЛОТОВ.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук.

Научный руководитель, профессор,  
кандидат технических наук

Г.А. МАНУХИН.

Минск, 1964 г.

БЕЛАРУСКІ  
ТЭХНАЛАГІЧНЫ ІНСТЫТУТ  
імя С. М. КІРАВА  
БІБЛІЯТЭКА

Работа выполнена на кафедре водного транспорта леса.  
Архангельского ордена Трудового Красного Знамени  
лесотехнического института им. В. В. Куйбышева

Автореферат разослан *27 апреля* 1964 г.

Защита состоится *27 мая* 1964 г.

Отзывы просим присылать по адресу:

г. Минск, улица Свердлова, 13, Белорусский технологический  
институт имени С. М. Кирова.

Ученый секретарь

- I -

Транспорт лесоматериалов по водным путям является одной из важных составных частей в общем грузообороте речного транспорта СССР. В перевозках лесоматериалов доминирующее положение занимают плотовые перевозки. В настоящее время около 54% объема сплавляемой древесины доставляется потребителям в плотах за механической тягой. Перспективным планом экономического развития СССР намечено довести объем перевозок леса в плотах до 65% от объема сплава по пуску. Увеличение объемов водной транспортировки лесоматериалов в плотах, ставит новые ответственные задачи перед организациями, занимающимися развитием этой отрасли экономики. Их успешное решение возможно только на основе дальнейшего совершенствования технологических процессов сплотки леса, улучшения конструкций существующих и внедрения новых типов плотов, а так же способов их буксировки.

#### I. Состояние вопроса и задачи диссертации

258-246  
Научно-исследовательскими организациями, а так же отдельными авторами в Советском Союзе выполнены большие работы по изучению основных проблем плотового сплава леса. Проведены значительные экспериментально-теоретические исследования таких вопросов, как сопротивление воды движению плотов, определению их наиболее выгоднейших габаритов и управляемости при буксировке. Созданы конструкции плотов для основных речных бассейнов страны.

Однако, в этой области имеются ещё малоразработанные вопросы, которые в значительной мере тормозят развитие плотовых перевозок. К их числу относится и вопрос установления необходимой механической прочности плотов. Задача определения сил, действующих на такелажные крепления плота, менее других изучена

в практике и теории лесосплава. Имеющиеся экспериментальные и теоретические работы посвящены, главным образом, вопросам определения величины сопротивления воды движению плота или его управляемости при буксировке.

Современное состояние этих вопросов рассматривается в диссертационной работе.

Решение задачи по нахождению общей величины сопротивления воды движению плотов ещё не даёт ответа на вопрос, каким образом возникающие силы, действуют на отдельные элементы плота, каково их распределение и взаимодействие. Отсутствие достаточно обоснованной методики расчета приводит к ошибкам при определении усилий в такелажных креплениях плота и их размеров. Все это, в конечном итоге, ведет к авариям плотов и потерям лесоматериалов при буксировке.

Задача настоящей работы состояла в том, что экспериментальным путем найти величины сил, действующих на такелажные элементы буксируемых плотов и на этой основе дать метод определения усилий, возникающих в такелажных креплениях плотов.

## 2. Методика и состав исследования.

Для решения вопросов, поставленных перед настоящим исследованием, была разработана методика проведения экспериментальных работ. Экспериментальная часть проводилась на опытных плотах. Место испытаний - реки Б. Северная Двина и Печора в наиболее характерные периоды стояний горизонтов воды, как на перекатах, так и на плесовых участках.

Плоты в Северо-Двинском бассейне формировались на рейде "Шипицыно", (г. Котлас) находящимися в 632 км от Архангельска, с

проводной их до Архангельского порта. На реке Печоре исходным пунктом был выбран рейд "Подчерье", расположенный в 230 км от основного пункта приплава г. Печоры. Объем опытных плотов составлял от 6 до 24 тыс. м<sup>3</sup>. Мощность буксировщиков в 250 и 450 л. с.

Проплав однотипных плотов в разные периоды навигации, дал возможность установить величины сил, действующих на такелажные крепления плота в различные моменты времени, при различных условиях пути.

В процессе проплава выполнялись следующие работы:

1. Наблюдение за буксировкой плотов на прямолинейных и криволинейных участках пути.
2. Определение условий обтекания и замер скоростей движения плота.
3. Снятие характеристик режима работы машины паротеплохода - буксировщика.
4. Нахождение величин изгиба плота и положение его по отношению к буксировщику.
5. Измерение усилий на гаке, в буксирных тросах, бортовых лежнях, усе, продольном и поперечном оплотнике, борткомплектах и обвязках пучков.

Измерение сил, действующих на такелажные крепления плота, производилось с помощью электродинамометров конструкции АЛТИ, с автоматической записью показаний электронным потенциометром типа ЭПП-09.

Скорости обтекания плота потоком измерялись гидрометрическими вентушками с записью их показаний электрохронографом. Нахождение величин изгиба плота осуществлялось угломерами конст-

рукции АЛТИ с механической записью показаний на круговой диаграмме, приводимой в движение от часового механизма.

### 3. Результаты исследований.

Цикл измерений проводился на секционных плотках типа ЦНИИ-лесосплава-ЛИИВТа - АЛТИ-М и АЛТИ-Печорлесосплав. Плотки формировались согласно "Временных технических условий на речные плотки для Северо-Двинского и Печорского бассейнов", разработанных кафедрой водного транспорта леса АЛТИ.

В результате проведенных опытов получены данные о величине и распределении нагрузок на такелажные крепления и поведении плотков в различных путевых условиях. Опытами установлено, что основную часть нагрузки от силы тяги буксировщика воспринимает тросовые крепления плотки, а оплотные цепи не более 23% от силы тяги на гаке буксировщика.

На прямолинейных участках пути сила тяги раскладывается на оба борта плотки равномерно, а колебания нагрузок в такелажных креплениях не велики. При движении на криволинейных участках колебания нагрузок принимают больший размах. Наблюдениями установлено, что максимальные значения сил в такелажных креплениях, возникают при криволинейном движении плотки в момент, когда усилие тяги на гаке целиком передается на один из буксирных тросов, а плот располагается на дуге наименьшего радиуса кривизны. При этом, в опытных плотках, смежные секции располагались под максимальным углом, близким к 30°.

Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что действующие на такелажные крепления плотки усилия зависят, главным образом, от степени натяжения буксирного троса и изги-

ба плотки. По данным обработки результатов опытов построены графики изменения нагрузки в такелажных креплениях плотки в зависимости от натяжения в буксирном тросе:  $F_{TK} = f(F_S)$

Проведенные испытания плотков и анализ полученных материалов, позволили разработать метод определения сил, действующих на их такелажные крепления.

### Расчет сил, действующих на такелажные элементы буксируемых плотков.

Управление неравномерного поступательного движения плотки может быть представлено в следующем виде:

$$R_{nn} + (m + \lambda) \frac{dV}{dt} = F_r + R_i$$

Здесь:  $R_{nn}$  - сопротивление воды движению плотки, кг

$$m = \frac{G_{nn}}{g}$$

$m$  - масса плотки в  $\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}}$

$G_{nn}$  - вес плотки, кг.

$g$  - ускорение силы тяжести м/сек<sup>2</sup>

$V$  - скорость перемещения плотки относительно воды, м/сек<sup>2</sup>

$t$  - время, сек.

$F_r$  - сила тяги на гаке буксировщика, кг.

$$R_i = G_{nn} \cdot i$$

$R_i$  - сила влечения плотки от уклона пути, кг.

$i$  - уклон пути

$\lambda$  - присоединенная масса воды  $\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}}$

В дальнейшем будем обозначать:

$$(m + \lambda) \frac{dV}{dt} = M \frac{dV}{dt}$$

Как показали проведенные исследования, буксировка плотов проводится в основном при постоянном режиме работы машины паро теплохода - буксировщика. В этих условиях, движение плота можно принять равномерно-поступательным на данном участке пути.

Поэтому, ускорение плота в целом:  $\frac{dV}{dt} = 0$ ;  $M \frac{dV}{dt} = 0$ ;

$R_c$  - сила влечения плота от уклона пути для равнинных рек не велика и не оказывает существенного влияния на буксируемый плот. При установившемся движении системы буксировщик + плот:

$$R_{nn} = F_r$$

Секционный плот, с достаточной для практических расчетов точностью, можно представить в виде отдельных "жестких" секций соединенных последовательно гибкими связями. Основным фактором определяющим величину усилия действующего на плот, является сила тяги на гаке буксировщика -  $F_r$ . Она передается плоту, обычно, посредством двух буксирных тросов, закрепленных одним концом за борт плота, другим за гак паротеплохода.

При установившемся прямолинейном движении системы - буксировщик + плот  $R_{nn} = F_r$  направлена по диаметральной плоскости системы. Если разложить эти силы на их составляющие по буксирным тросам, то величина усилий в буксирном тросе равна:

$$R_s = \frac{R_{nn}}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{F_r}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = F_s$$

$\alpha$  - угол расхождения буксирных тросов.

При отклонении буксировщика от диаметральной плоскости плота на некоторый угол  $\beta$ , величина усилия, приходящегося на буксирный трос, определяется по следующей формуле:

$$F_s = \frac{F_r}{\sin \alpha} \sin \left( \frac{\alpha}{2} \pm \beta \right) \quad (1)$$

Знак (+) соответствует натяжению троса, знак (-) его ослаблению.

Силы, приложенные к борту плота, раскладываются на две составляющие  $F_1$  и  $F_1'$ .

Сила  $F_1$  вызывает поступательное движение плота и действует на продольные такелажные крепления:

$$F_1 = F_s \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

Сила  $F_1'$  вызывает разворот плота в требуемом направлении и равна:

$$F_1' = F_s \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

Анализ выражения (1) показывает, что максимальная величина силы, передающейся на буксирный трос, возникает в момент совпадения диаметральной плоскости буксировщика с направлением одного из буксирных тросов, т.е. при  $\beta = \frac{\alpha}{2}$ . В этом случае вся величина силы  $F_r$  передается на один из буксирных тросов:  $F_s = F_r$ . Сила  $F_1$  в этот момент так же достигает своего максимума:

$$F_1^{max} = F_r \cos \frac{\alpha}{2}$$

#### а) Расчет продольных сил.

Составляющая сила буксирного троса воспринимается в основном бортовым лежнем I секции плота и равна:

$$F_{Iсек} = \frac{\alpha_0 F_r}{\sin \alpha} \sin \left( \frac{\alpha}{2} \pm \beta \right) \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

где:  $\alpha_0$  - безразмерный коэффициент, учитывающий передачу части нагрузки на растяжение - усы. Максимальная величина силы, передающейся на продольный лежень I секции будет при

Для того чтобы установить механизм передачи нагрузки  $F_1$ , на секции последующие за первой, рассмотрим силы, действующие на плот.

При движении каждая секция плота обладает своим собственным сопротивлением,  $(R_1, R_2, R_3, \dots, R_n)$  следовательно общее сопротивление плота равно:

$$R_{nn} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{m=1}^n R_m$$

Так как секции плота движутся в попутном потоке то:

$$R_1 > R_2 > R_3 > \dots > R_n$$

В соответствии с этим уравновешивающие это сопротивление (действующие) силы при  $R_{nn} = F_r$  будут:

$$F_1 > F_2 > F_3 > \dots > F_n$$

Величины этих сил могут быть найдены следующим образом:

$$F_2 = \alpha_1 F_1; \quad F_3 = \alpha_2 F_2 \quad \dots \quad F_n = \alpha_{n-1} F_{n-1}$$

где:  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$  - величина сил, действующая на секции плота.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$  - безразмерный коэффициент, учитывающий степень уменьшения сопротивления воды движению секций за счет попутного потока.

Величина коэффициента "а" определяется опытным путем.

В конечном итоге силы  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$  передаются на бортовые лежни, к которым подвешиваются секции. При криволинейном движении эти силы направлены по касательной к борту плота. Кроме того, возникает центробежные силы инерции  $N$ , перпендикулярные и касательным силам. Величина касательных сил может быть найдена из выражений:

$$F_2 = \frac{\alpha_1 F_1}{\cos \gamma_1}; \quad F_3 = \frac{\alpha_2 F_2}{\cos \gamma_2} \quad \dots \quad F_n = \frac{\alpha_{n-1} F_{n-1}}{\cos \gamma_{n-1}} \quad (3)$$

где:  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$  - угол между направлением бортов двух смежных секций.

Исходя из выражений (2 и 3) величина усилия, приходящаяся на  $n$ -ю секцию плота может быть найдена по зависимости:

$$F_n = \frac{\alpha_{n-1} F_{n-1}}{\cos \gamma_{n-1}} = \prod_{m=1}^n \frac{\alpha_{m-1} F_r}{\sin \alpha \cdot \cos \gamma_{m-1}} \sin(\frac{\alpha}{2} \pm \beta) \cos \frac{\alpha}{2}$$

Максимальная величина усилия в бортовом лежне  $n$ -й секции плота будет при  $\beta = \frac{\alpha}{2}$

$$F_n^{max} = \prod_{m=1}^n \frac{\alpha_{m-1} F_r}{\cos \gamma_{m-1}^{max}} \cos \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

б) Расчет поперечных сил.

Величина поперечных сил, действующих на плот при буксировке, определяется по формуле:

$$N = M \frac{U^2}{R}$$

$U$  - скорость движения плота относительно берега, м/сек.

$R$  - радиус кривизны плота, м.

Радиус кривизны плота может быть определен по следующей приближенной зависимости:

$$R \approx \frac{l}{\gamma}$$

где:  $l$  - длина секции, м.

$\gamma$  - угол между направлением бортов двух смежных секций, рад.

Наибольшая величина поперечных сил возникает при  $U = U_{max}$  и  $R = R_{min}$ , причем:  $R_{min} = \frac{l}{\gamma_{max}}$

В этом случае:

$$N_{max} = M \frac{U_{max}^2 \gamma_{max}}{l}$$

Максимальная величина усилия, действующего на единичное поперечное крепление плота может быть определена по зависимости:

$$N_m^{max} = M \frac{U_{max}^2 \gamma_{max}}{n K l}$$

$n$  - число секций в плоте

$K$  - число поперечных оплотников в секции.

В процессе работ производилось измерение величин изгиба плота и определение максимальных углов поворота смежных секций плота  $\gamma_{max}$ . Измерения показали, что для плотов типа ЦНИИЛесосплава-ЛИИВта-АЛТИ-М величина угла  $\gamma_{max}$  не превышает  $30^\circ$ , а плотов АЛТИ-Печорлесосплав  $35^\circ$ .

в) Аналитическое определение  $R_{min}$  и  $\gamma_{max}$

На основе анализа уравнений для определения продольных и поперечных сил, действующих на плот, нами получено следующее дифференциальное уравнение криволинейного движения:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{F_r}{MV} \frac{d\beta}{dt} - \frac{F_r L}{2J} \beta = 0$$

Здесь:

$\beta$  - угол поворота буксировщика, рад.

$t$  - время разворота, сек

$L$  - длина плота, м.

$J$  - момент инерции плота, кг м сек<sup>2</sup>.

Обозначив:

$$\frac{F_r}{MV} = 2h, \quad \alpha \quad \frac{F_r L}{2J} = K^2$$

Получим:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + 2h \frac{d\beta}{dt} - K^2 \beta = 0; \quad (6)$$

Характеристическое уравнение дифференциального:

$$z^2 + 2hz - K^2 = 0$$

Корни его:

$$z_1 = -h + \sqrt{h^2 + K^2}; \quad z_2 = -h - \sqrt{h^2 + K^2};$$

Общее решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$\beta = Ae^{z_1 t} + Be^{z_2 t} \quad (7)$$

где  $A$  и  $B$  - постоянные интегрирования, определяемые по начальным условиям движения.

$e$  - основание натуральных логарифмов.

Анализ выражения  $Ae^{z_2 t}$  показывает, что второй член уравнения не значителен по величине и для практических расчетов может быть принят равным нулю. Следовательно, уравнение (7) можно представить в виде:

$$\beta = Ae^{z_1 t} \quad (8)$$

Исходя из выражения (8) получено уравнение траектории плота при его криволинейном движении

$$y = \sqrt{A} \frac{1}{v} e^{\frac{z}{v} x}$$

обозначив  $\sqrt{A} \frac{1}{v} = C$  уравнение траектории представим в виде:

$$y = Ce^{\frac{z}{v} x}$$

Для определения радиуса кривизны берем производные

$$\frac{dy}{dx} = C \frac{z}{v} e^{\frac{z}{v} x}; \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = C \frac{z^2}{v^2} e^{\frac{z}{v} x}$$

Отсюда:

$$R = \frac{[1 + (\frac{dy}{dx})^2]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

Найдя экстремум функции получим, что:

$$x = \frac{\sqrt{c}}{2\pi} \ln \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2 \pi^2}$$

Решение данного выражения показывает, что точка наибольшего прогиба плота находится на расстоянии  $x = 0,7L$  от хвоста плота при наибольшей наблюдаемой величине отклонения угла  $\beta$  буксировщика.

Следовательно:

$$R_{min} = \frac{v^2}{c \pi^2 e^{0,7 \frac{\pi}{v} L}} \quad (9)$$

Максимальная величина угла  $\beta$  может быть определена из выражения  $\beta_{max} = \frac{v}{R_{min}}$  или:

$$\beta = \frac{v c e^{0,7 \frac{\pi}{v} L}}{v^2} \quad (10)$$

Измеренные величины углов  $\beta_{max}$  практически совпадают с расчетными, получаемыми по формуле (10).

Минимальные радиусы кривизны изгиба плотов и максимальные углы поворота секций для плотов, буксируемых в бассейнах рек Б.Северной Двины и Печоры представлены, в таблице.

№	Габариты			Минимальные радиусы кривизны плота М	Максимальный угол поворота град	Примечание
	L	B	T			
1	415	80	1,5	230	20°	Северо-Двинские типы плотов
2.	385	65	1,2	200	23°	
3.	385	60	1,2	185	25°	
4.	225	50	1	150	30°	
1.	385	60	1,2	185	25°	Печорские типы плотов.
2.	385	40	1,2	140	33°	
3.	225	30	1	120	35°	

д) Определение коэффициентов передачи нагрузки с буксирного гака на такелажные крепления плотов.

Наличие экспериментальных кривых  $F_{TK} = f(F_s)$  позволяет определить величину отношения максимальных сил, возникающих в такелажных креплениях плота к максимальной величине усилия в буксирном тросе, равном силе тяги на гаке -  $F_r$ .

Это отношение названо коэффициентом передачи  $K$ :

$$K = \frac{F_{TK}^{max}}{F_r}$$

Величина коэффициентов "К", соответствующая максимальным значениям сил в такелажных креплениях плотов, приводится в таблице:



Проведенные экспериментально-теоретические работы позволили снизить количество такелажных креплений при одновременном увеличении прочности плота, так для плота ЦНИИЛесосплава-ЛИИВТа-АЛТИ-М"

Тип плота	Такелаж			Удельный расход такелажа в кг/м <sup>3</sup>		
	Цепи	Тросы	Всего	Цепи	Тросы	Всего
ЦНИИЛесосплава-ЛИИВТа-АЛТИ (400 x 75)	8800	3309	12109	0,55	0,21	0,76
ЦНИИЛесосплава-ЛИИВТа-АЛТИ-М (415 x 80)	5581	3775	9356	0,28	0,19	0,47

В результате выполненной работы получены зависимости:

1. По определению сил, действующих на основные такелажные крепления плота - секционные лежни, усы, продольный внутренний, наружный и поперечный плотники;
2. По определению траектории криволинейного движения плота;
3. По определению минимального радиуса кривизны изгиба плота;
4. По определению максимальных углов поворота смежных секций плота;

Кроме того, проведенные исследования позволили дать ряд практических рекомендаций по вопросам:

- а) крепления секционных лежней в голове и хвосте плота;
- б) крепления усов - растяжек;
- в) крепления секций к бортовым лежням;
- г) повышения прочности головной и хвостовой части плота;
- д) обоснования необходимого количества поперечных креплений плота.

Такелажные крепления	Секции					Усы	Оплотник		
	I	II	III	IV	V		Продольные внутр.	Поперечные	Продольные наруж.
К	0,75	0,65	0,50	0,38	0,35	0,40	0,23	0,22	0,20

Эти значения коэффициента "К" могут быть отнесены к паротеплоходу любой мощности. Для практических расчетов сил, действующих на такелажные крепления, рекомендуется пользоваться зависимостью:

$$F_{TK}^{max} = K F_r$$

Для определения коэффициентов "α", входящих в состав теоретических зависимостей, приведенных выше, так же используется коэффициент К. Например при определении усилий в бортовых лежнях:

$$F_{TK}^{max} = \prod_{m=1}^n \frac{\alpha_{m-1} F_r}{\cos \sqrt{m-1}^{max}} \cos \frac{\alpha}{2}$$

Исходя из этого будем иметь:

$$\frac{F_{TK}^{max}}{F_r} = \prod_{m=1}^n \frac{\alpha_{m-1}}{\cos \sqrt{m-1}^{max}} \cos \frac{\alpha}{2} = K$$

Откуда:

$$\alpha_m = \prod_{m=1}^n \frac{K \cdot \cos \sqrt{m-1}^{max}}{\alpha_{m-1} \cos \frac{\alpha}{2}}$$

На основе изложенной методики определения усилий в такелажных креплениях секционных плотов для речных условий произведен расчет их для плотов Северо-Двинского бассейна (плот ЦНИИЛесосплава - ЛИИВТа - АЛТИ-М) и для Печорского (плот АЛТИ-Печорлесосплав). На эти плоты составлены "Технические условия", которые приняты промышленностью.

Все это позволит в дальнейшем более правильно и обоснованно проектировать такелажные крепления того или иного типа речного секционного плота.

Основное содержание диссертаций опубликовано автором в следующих печатных работах:

1. ВЛАДИМИРОВ С.А. "К вопросу об усилиях, возникающих в такелажных креплениях секционных речных плотов".

"Лесной журнал" № 6, 1961.

2. ВЛАДИМИРОВ С.А. "К вопросу об определении усилий в такелажных креплениях секционных плотов".

"Лесной журнал" № 5, 1962.

3. ВЛАДИМИРОВ С.А. "Расчет максимальных продольных и поперечных сил, действующих на секционный плот при буксировке".

"Лесной журнал" № 6, 1962.

4. МАНУХИН Г.А., ВЛАДИМИРОВ С.А. "Расчет прочности секционного плота".

Журнал "Лесная промышленность" №№ 6 и 7, 1962.

5. МАНУХИН Г.А., ВЛАДИМИРОВ С.А. "Речные плоты для рек Европейского Севера".

Научно-техническая конференция по вопросам развития лесовозного (сухопутного и водного) транспорта леса.

Сборник докладов. ЛТА, 1962.