

## Определение сил, действующих на крупногабаритную сплottedную единицу при ее свободном движении в потоке на закругленном участке реки

М. М. Овчинников,<sup>1</sup>  
Н. П. Боброва,  
В. Ю. Соловьев

Санкт-Петербургская государственная  
лесотехническая академия

В работе приведены расчеты центробежной и кориолисовой сил инерции и составляющей веса сплottedной единицы из-за наличия поперечного уклона свободной поверхности потока на повороте реки в зависимости от среднего радиуса кривизны русла, скоростей течения, поперечного уклона и т. д. Кроме того, даны рекомендации по подбору судна сопровождения для беспрепятственного движения сплottedной единицы.

**Ключевые слова:** крупногабаритная сплottedная единица, центробежная и кориолисова силы.

Внедрение в производство экологически безопасной технологии проплава крупногабаритных сплottedных единиц без применения искусственной тяги по судоходным и временносудоходным рекам в ранний весенний период позволит сократить объемы молевого лесосплава, снизить потребность в транспортных средствах примерно в 2 раза (буксирных судов, лесозавозов и т. д.), уменьшить в 1,5...2,5 раза продолжительность проведения лесосплавных работ, ликвидировать потери лиственной и тонкомерной хвойной древесины.

Для разработки безопасной технологии проплава таких сплottedных единиц - лесосплавных модулей необходимо знать величины сил, действующих на модуль при его свободном движении в потоке на закругленных участках рек. Это необходимо для того, чтобы предотвратить оседание сплottedной единицы на мелководную, прибрежную часть русла реки.

В данной работе и рассматривается случай свободной транспортировки (без искусственной тяги) крупногабаритных сплottedных единиц на закругленных участках рек.

На рис. 1 в виде дуги  $AB$  показана линия берега реки. Кроме того, вводится допущение, что центр масс плота описывает траекторию  $A'B'$ , которая полностью совпадает с очертанием линии берега реки  $AB$ .

При таком допущении радиус кривизны центра масс лесосплавного модуля будет совпадать с радиусом

кривизны дуги берега  $AB$ . В этом случае средний радиус кривизны дуги  $AB$  берега реки будет равен

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta \alpha}, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  - длина дуги  $AB$ ;  
 $\Delta \alpha$  - угол смежности в радианах.

Длину дуги  $\Delta S$  и угол смежности  $\Delta \alpha$  можно легко определить в натуре при помощи измерительных геодезических приборов.

Криволинейные в плане русла - наиболее распространенный в природных условиях тип русел. Именно поэтому изучению потоков в криволинейных руслах с целью создания научно обоснованных методов расчета их параметров уделяется большое внимание.

При рассмотрении ускоренного движения лесосплавного модуля, движущегося свободно в потоке, следует кроме обычных сил учитывать силы инерции:

- в случае вращательного движения наряду с центростремительной силой, обусловленной перепадом давления, следует учитывать приложенную к телу центробежную силу инерции;
- кориолисову силу инерции от массы лесосплавного модуля;
- составляющую веса сплottedной единицы, возникающую из-за поперечного уклона свободной поверхности реки.

На изгибе русла возникает поперечный уклон свободной поверхности, обусловленный влиянием центробежных сил инерции. При этом уровень воды у внешнего берега значительно превышает уровень воды у внутреннего берега. Значения поперечного уклона свободной поверхности могут быть больше значения продольного уклона.

Для прямоугольной или близкой к ней форме поперечного сечения русла с горизонтальным дном, при гидростатическом распределении давлений по глубине и при изменении скоростей течения на изгибе русла по закону площадей величину поперечного уклона свободной поверхности потока можно найти по формуле

$$l_r = \alpha \cdot \frac{V_0^2 \cdot r_0^2}{g \cdot r^3}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - эмпирический коэффициент, учитывающий трение, можно принять  $\alpha=1$ ;  
 $V_0$  - средняя скорость потока;

<sup>1</sup> Авторы - соответственно профессор, инженер и студент V курса

$r_0$  - расстояние от центра поворота до линии траектории движения сплоточной единицы, т. е.

$$r_0 = \rho_{\text{ср}};$$

$r$  - текущий радиус кривизны; его значения меньше  $r_0$  на величину равную половине ширины реки.

Поэтому в данной работе рассмотрим наиболее распространенные ширины рек 50, 100, 150 и 200 м. При этом значения  $r$  будут меньше значений  $r_0$  соответственно на 25, 50, 75 и 100 м.

Найдя величину поперечного уклона  $I_r$ , можно вычислить значение угла наклона свободной поверхности  $\beta$  по следующей зависимости:

$$\beta = \arctg I_r. \quad (3)$$

Зная угол наклона свободной поверхности и значение массы крупногабаритной сплоточной единицы  $M_0$ , можно определить значение составляющей веса  $M_1$  сплоточной единицы на повороте реки по следующей формуле

$$M_1 = M_0 \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

Значение центробежной силы  $\Phi_{\text{ц}}$  от массы сплоточной единицы  $M_0$ , при движении центра масс по дуге  $A'B'$  (см. рис. 1) может быть найдено по формуле

$$\Phi_{\text{ц}} = M_0 \cdot \frac{V_{\text{с}}^2}{\rho_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{с}}$  - скорость течения реки, которая согласно принятому допущению равна скорости центра масс плота.

При расчетах силы  $\Phi_{\text{ц}}$  надо знать массу лесотранспортной единицы  $M_0$ . Произведем численную оценку этой массы для крупногабаритной сплоточной единицы, кратной по размерам сплотиваемой части плота в Волжско-Камском бассейне и состоящей из 24 пучков. Плановые размеры такой сплоточной единицы

$$2a \times 2b = 24 \times 24, \text{ м.}$$

При этом рассмотрим две конструкции единичных пучков, входящих в крупногабаритную сплоточную единицу:

- в виде прямоугольного параллелепипеда длиной  $2b = 6$  м, шириной  $2a = 4$  м, высотой  $2c = 2,2$  м;
- пучка с такими же габаритами, но с эллиптической формой поперечного сечения.

Эти размеры пучка отвечают средним статистическим габаритам пучков, сплавиваемых в навигацион-

ный период на лесосплавных рейдах Волжско-Камского бассейна.

Воду в зазорах между отдельными бревнами пучка в его погруженной части следует включить в массу сплоточной единицы, ибо она совершает движение вместе с лесосплавным модулем.

Тогда масса крупногабаритной сплоточной единицы будет равна

$$M_0 = M_{\text{одр}} + M_{\text{о вод}}. \quad (6)$$

Для сплоточной единицы, состоящей из 24 пучков прямоугольной формы поперечного сечения, массы древесины  $M_{\text{одр}}$  и воды  $M_{\text{о вод}}$  могут быть рассчитаны по зависимостям

$$M_{\text{одр}} = 24 \times 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \rho_{\text{др}}, \quad (7)$$

$$M_{\text{о вод}} = 24 \times 8 \cdot a \cdot b \cdot h \cdot (1-k) \cdot \rho_{\text{вод}}, \quad (8)$$

где:  $K$  - коэффициент полндревесности пучка, эта величина для сортиментных пучков в среднем равна  $K=0,68$ ;

$\rho_{\text{др}}$  - плотность древесины, в расчетах принимают  $\rho_{\text{др}}=800$  кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{вод}}$  - плотность воды,  $\rho_{\text{вод}}=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Осадка лесосплавного модуля  $2h$  с прямоугольным поперечным сечением пучков определяется по закону Архимеда

$$2h = 2c \cdot \frac{\rho_{\text{др}}}{\rho_{\text{вод}}}. \quad (9)$$

Выполнив соответствующие расчеты по формулам (7), (8) и (9) для крупногабаритной сплоточной единицы указанных выше размеров, получим

$$M_{\text{одр}}=101,3760 \cdot 10^4 \text{ кг,}$$

$$M_{\text{о вод}}=32,4403 \cdot 10^4 \text{ кг и } 2h=1,76 \text{ м,}$$

и в итоге масса лесосплавного модуля будет равна

$$M_0 = 101,3760 \cdot 10^4 + 32,4403 \cdot 10^4 = 133,8163 \cdot 10^4 \text{ кг.}$$

Для сплоточной единицы, состоящей из 24 пучков с эллиптической формой поперечного сечения, массы древесины  $M_{\text{одр}}$  и воды  $M_{\text{о вод}}$  определялись по формулам:

$$M_{\text{одр}} = 24 \times \pi \cdot a \cdot c \cdot 2b \cdot k \cdot \rho_{\text{др}}, \quad (10)$$

$$M_{\text{о вод}} = 24 \times (\pi \cdot a \cdot c - S) * \dots * 2b \cdot (1 - k) \cdot \rho_{\text{вод}} \quad (11)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения надводной части пучков, эта величина вычисляется по зависимости

$$S = \pi \cdot a \cdot c \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{др}}}{\rho_{\text{вод}}}\right) \quad (12)$$

Проведя необходимые расчеты по этим формулам, можно получить

$$S = 1,38 \text{ м}^2, \\ M_{\text{о др}} = 54,1145 \cdot 10^4 \text{ кг}, \\ M_{\text{о вод}} = 25,473 \cdot 10^4 \text{ кг}.$$

Следовательно, масса лесосплавного модуля будет равна

$$M_0 = 54,1145 \cdot 10^4 + 25,473 \cdot 10^4 = 79,5875 \cdot 10^4 \text{ кг}.$$

Кориолисова сила инерции от массы  $M_0$  может быть вычислена по зависимости

$$\Phi_{\text{кор}} = 2 \cdot M_0 \cdot \omega_3 \cdot V_c \cdot \sin \varphi, \quad (13)$$

где  $\omega_3$  - угловая скорость вращения земли,

$$\omega_3 = 7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с};$$

$V_c$  - скорость течения воды, направленная по касательной к меридиану, в нашем случае - это скорость центра масс лесосплавного модуля;

$\varphi$  - широта места.

На рис. 1 силы инерции  $\Phi_{\text{ц}}$  и  $\Phi_{\text{кор}}$  направлены в разные стороны, однако в ряде случаев центробежная и кориолисова силы могут складываться (см. рис. 2б и 2в), т. е. когда они направлены в одну сторону. В случае 2б течение направлено с севера на юг, а выпуклость дуги А'В' - на восток. Для схемы 2в течение направлено с юга на север, а дуга А'В' имеет выпуклость на запад. В остальных примерах 2а и 2г центробежная и кориолисова силы инерции направлены в разные стороны, поэтому неблагоприятное влияние центробежной силы на траекторию движения сплочной единицы уменьшается.

По формулам (4), (5) и (13) произведены расчеты сил инерции  $\Phi_{\text{ц}}$  и  $\Phi_{\text{кор}}$  и составляющей веса сплочной единицы  $M_1$  при скоростях течения  $V_c = 0,96$  м/с и  $V_c = 1,2$  м/с;  $\Delta S = 100$  м; различных радиусах кривизны  $\rho_{\text{кр}}$  и широт  $\varphi$ . Результаты расчета этих сил  $\Phi_{\text{ц}}$ ,  $\Phi_{\text{кор}}$  и  $M_1$  в Ньютонах с округлением последних значащих цифр представлены соответственно в табл. 1, 2 и 3 для сплочной единицы из пучков прямоугольной формы поперечного сечения и в табл. 4, 5 и 6 - из пучков с эллиптической формой поперечного сечения.

Таблица 1

Значения центробежных сил инерции  $\Phi_{\text{ц}}$  при  $M_0 = 133,8163 \cdot 10^4$  кг и  $\Delta S = 100$  м

$V_c = 0,96$ м/с										
$\Delta\alpha^\circ$	3	5	7	9	11	13	15	20	25	36
$\Delta\alpha$ , рад	0,052	0,087	0,122	0,157	0,192	0,227	0,262	0,349	0,436	0,628
$\rho_{\text{кр}}$ , м	1911	1146	819	637	521	441	382	287	229	159
$\Phi_{\text{ц}}$ , Н	645	1076	1506	1936	2366	2797	3227	4303	5378	7745
$V_c = 1,2$ м/с										
$\Phi_{\text{ц}}$ , Н	1008	1681	2353	3025	3698	4370	5042	6723	8404	12101

Таблица 2

Значения кориолисовой силы инерции  $\Phi_{\text{кор}}$  при  $M_0 = 133,8163 \cdot 10^4$  кг и  $\omega_3 = 7,2722 \cdot 10^{-5}$  1/с

$V_c = 0,96$ м/с				
$\varphi^\circ$	40	50	60	70
$\sin \varphi$	0,643	0,766	0,866	0,940
$\Phi_{\text{кор}}$ , Н	120	143	161	175
$V_c = 1,2$ м/с				
$\Phi_{\text{кор}}$ , Н	150	179	202	219

Таблица 3

Значения составляющей веса  $M_1$  сплочной единицы при  $M_0=133,8163 \cdot 10^4$  кг

$R_0 = \rho_{ср}, м$	1911				1146				819			637			521					
г, м	1886	1861	1836	1811	1121	1096	1071	1046	794	769	744	719	612	587	562	537	496	471	446	421
$V_c=0,96$ м/с																				
Уклон $I_r \cdot 10^{-5}$	5,01	5,32	5,54	5,78	8,76	9,37	10,0	11,0	12,5	13,8	15,3	16,9	16,6	18,8	21,5	24,6	21,0	24,4	28,7	34,2
Угол $\beta$ , рад	0,0029	0,003	0,0031	0,0033	0,005	0,0054	0,0057	0,0062	0,0072	0,0079	0,0087	0,0097	0,0095	0,011	0,012	0,014	0,014	0,014	0,016	0,019
$M_1$ , Н	68	70	72	77	117	126	133	145	168	184	203	226	222	257	280	327	280	327	374	444
$V_c=1,20$ м/с																				
Уклон $I_r \cdot 10^{-5}$	7,99	8,32	8,66	9,02	13,7	14,6	15,7	16,8	19,7	21,6	23,9	26,5	26,0	29,4	33,5	38,5	32,6	38,1	44,9	53,4
Угол $\beta$ , рад	0,0046	0,0048	0,0049	0,0052	0,0078	0,0084	0,009	0,0096	0,011	0,012	0,014	0,015	0,015	0,017	0,019	0,022	0,019	0,022	0,026	0,031
$M_1$ , Н	107	112	114	121	182	196	210	224	257	280	327	350	350	397	444	514	444	514	607	724
$\rho = \rho_{ср}, м$	441				382				287			229			159					
г, м	416	391	366	341	357	332	307	282	262	237	212	187	204	179	154	129	134	109	84	59
$V_c=0,96$ м/с																				
Уклон $I_r \cdot 10^{-5}$	25,4	30,6	37,3	46,0	30,1	37,5	47,4	61,1	43,0	58,1	81,2	118,3	58,0	85,9	134,9	229,5	98,7	183,4	400,7	1156,4
Угол $\beta$ , рад	0,015	0,017	0,021	0,026	0,017	0,021	0,027	0,035	0,025	0,033	0,046	0,068	0,033	0,049	0,077	0,131	0,056	0,105	0,229	0,662
$M_1$ , Н	350	397	490	607	397	490	631	817	584	771	1074	1588	771	1144	1798	3059	1308	2452	5348	15461
$V_c=1,20$ м/с																				
Уклон $I_r \cdot 10^{-5}$	39,6	47,7	58,2	72,0	47,1	58,5	74,0	95,5	67,2	90,8	126,9	189,9	90,7	134,2	210,8	358,6	154,2	286,5	626,1	1806,9

Продолжение табл. 3

Угол $\beta$ , рад	0,023	0,027	0,033	0,041	0,027	0,033	0,042	0,055	0,038	0,052	0,073	0,106	0,052	0,077	0,121	0,205	0,088	0,164	0,359	1,035
$M_1$ , Н	537	631	771	957	631	771	980	1284	887	1214	1705	2476	1214	1798	2826	4788	2055	3830	8384	24171

Таблица 4

Значения центробежных сил инерции  $\Phi_{ц}$  при  $M_0=79,5875 \cdot 10^4$  кг и  $\Delta S=100$ м

$V_c=0,96$ м/с										
$\Delta\alpha^\circ$	3	5	7	9	11	13	15	20	25	36
$\Delta\alpha$ , рад	0,052	0,087	0,122	0,157	0,192	0,227	0,262	0,349	0,436	0,628
$\rho_{ср}$ , м	1911	1146	819	637	521	441	382	287	229	159
$\Phi_{ц}$ , Н	384	640	897	1151	1408	1663	1920	2565	3203	4613
$V_c=1,2$ м/с										
$\Phi_{ц}$ , Н	600	1000	1401	1799	2199	2599	3000	4007	5005	7208

Таблица 5

Значения кориолисовой силы инерции  $\Phi_{кор}$  при  $M_0=79,5875 \cdot 10^4$  кг и  $\omega_3=7,2722 \cdot 10^{-5}$  1/с

$V_c=0,96$ м/с								
$\varphi^\circ$	40		50		60		70	
$\sin \varphi$	0,643		0,766		0,866		0,940	
$\Phi_{кор}$ , Н	71		85		96		104	
$V_c=1,2$ м/с								
$\Phi_{кор}$ , Н	89		106		120		131	

Таблица 6

Значения составляющей веса  $M_1$  сплочной единицы при  $M_0=79,5875 \cdot 10^4$  кг

$R_0=\rho_{ср}$ , м	1911				1146				819				637				521			
$r$ , м	1886	1861	1836	1811	1121	1096	1071	1046	794	769	744	719	612	587	562	537	496	471	446	421
$V_c=0,96$ м/с																				
Уклон $I_r \cdot 10^{-5}$	5,01	5,32	5,54	5,78	8,76	9,37	10,0	11,0	12,5	13,8	15,3	16,9	16,6	18,8	21,5	24,6	21,0	24,4	28,7	34,2
Угол $\beta$ , рад	0,0029	0,003	0,0031	0,0033	0,005	0,0054	0,0057	0,0062	0,0072	0,0079	0,0087	0,0097	0,0095	0,011	0,012	0,014	0,014	0,014	0,016	0,019
$M_1$ , Н	40	42	43	46	69	75	79	86	100	109	121	135	132	153	167	194	167	194	222	264



Продолжение табл. 6

V <sub>c</sub> =1,20 м/с																				
Уклон I <sub>r</sub> ·10 <sup>-5</sup>	7,99	8,32	8,66	9,02	13,7	14,6	15,7	16,8	19,7	21,6	23,9	26,5	26,0	29,4	33,5	38,5	32,6	38,1	44,9	53,4
Угол β, рад	0,0046	0,0048	0,0049	0,0052	0,0078	0,0084	0,009	0,0096	0,011	0,012	0,014	0,015	0,015	0,017	0,019	0,022	0,019	0,022	0,026	0,031
M <sub>1</sub> , Н	64	65	68	72	108	117	125	133	153	167	194	208	208	236	264	305	264	305	361	431
г <sub>0</sub> =ρ <sub>ср</sub> , м	441				382				287				229				159			
г, м	416	391	366	341	357	332	307	282	262	237	212	187	204	179	154	129	134	109	84	59
V <sub>c</sub> =0,96 м/с																				
Уклон I <sub>r</sub> ·10 <sup>-5</sup>	25,4	30,6	37,3	46,0	30,1	37,5	47,4	61,1	43,0	58,1	81,2	118,3	58,0	85,9	134,9	229,5	98,7	183,4	400,7	1156,4
Угол β, рад	0,015	0,017	0,021	0,026	0,017	0,021	0,027	0,035	0,025	0,033	0,046	0,068	0,033	0,049	0,077	0,0131	0,056	0,105	0,229	0,662
M <sub>1</sub> , Н	208	236	292	361	236	292	375	486	347	458	639	944	458	681	1069	1820	778	1458	3181	9195
V <sub>c</sub> =1,20 м/с																				
Уклон I <sub>r</sub> ·10 <sup>-5</sup>	39,6	47,7	58,2	72,0	47,1	58,5	74,0	95,5	67,2	90,8	126,9	189,9	90,7	134,2	210,8	358,6	154,2	286,5	626,1	1806,9
Угол β, рад	0,023	0,027	0,033	0,041	0,027	0,033	0,042	0,055	0,038	0,052	0,073	0,106	0,052	0,077	0,121	0,205	0,088	0,164	0,359	1,035
M <sub>1</sub> , Н	319	375	458	569	375	458	593	764	528	722	1014	1472	722	1069	1681	2847	1222	2278	4987	14376

Анализ данных табл. 1...6 позволяет сделать следующие выводы:

1. Для рассмотренных масс сплочной единицы, скоростей течения и наиболее характерного диапазона изменения средних радиусов кривизны русла  $\rho_{ср}=521...229$  м центробежная сила инерции  $\Phi_{ц}$  увеличивается в 2,3 раза, в пределах  $\rho_{ср}=1911...637$  м сила  $\Phi_{ц}$  возрастает в 3,0 раза.
2. При вышеописанных условиях и пределах изменения широт  $\varphi=40...70^\circ$  центробежная сила инерции  $\Phi_{ц}$  значительно больше кориолисовой силы  $\Phi_{кор}$ , а именно  $\Phi_{кор}=(0,02...0,06) \Phi_{ц}$ . Поэтому влияние силы  $\Phi_{кор}$  на траекторию движения лесосплавного модуля незначительно.
3. Для изученного диапазона изменения радиуса  $r_0$  на 25, 50, 75 и 100 м, т. е. для соответственного увеличения ширины потока при большом  $\rho_{ср}=1911$  м составляющая веса сплочной единицы  $M_1$ , обусловленная поперечным уклоном свободной поверхности потока на повороте реки, увеличивается только на 13%, а при малом  $\rho_{ср}=229$  м величина  $M_1$  уже возрастает в 4 раза.
4. В случае изменения среднего радиуса кривизны русла  $\rho_{ср}$  от 1911 до 637 м  $M_1=(0,11...0,17) \Phi_{ц}$  а

при изменении  $\rho_{cp}$  от 521 до 229 м  $M_1=(0,19\dots 0,57) \Phi_{ц}$ , т. е. с уменьшением радиуса кривизны потока возрастает влияние составляющей веса сплотовой единицы  $M_1$  на характер ее движения в потоке, при этом с увеличением ширины реки это влияние увеличивается.

Таким образом, приведенные в данной работе расчеты инерционных сил  $\Phi_{ц}$ ,  $\Phi_{кор}$  и составляющей веса сплотовой единицы  $M_1$  показывают, что наиболее существенное влияние на траекторию движения лесосплавного модуля оказывают силы  $\Phi_{ц}$  и  $M_1$ , т. е. совместное действие сил определяет "наполнение" сплотовой единицы на береговую отмель.

При разработке технологических процессов проплава крупногабаритных сплотовых единиц на закругленных участках рек, а именно при подборе судов сопровождения для обеспечения беспрепятственного движения в потоке таких единиц необходимо, чтобы тяговое усилие судна было бы больше величины равнодействующей силы на 20...30%.

Величину равнодействующей силы можно определить по следующему выражению:

$$\Phi_p = \Phi_{ц} - M_1 \pm \Phi_{кор}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 110-112.

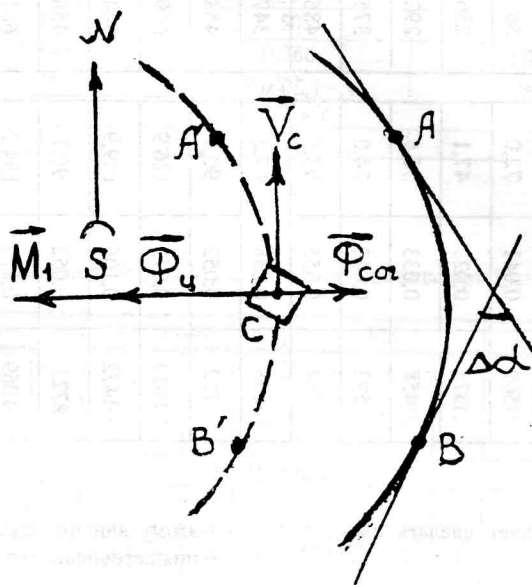


Рис. 1.

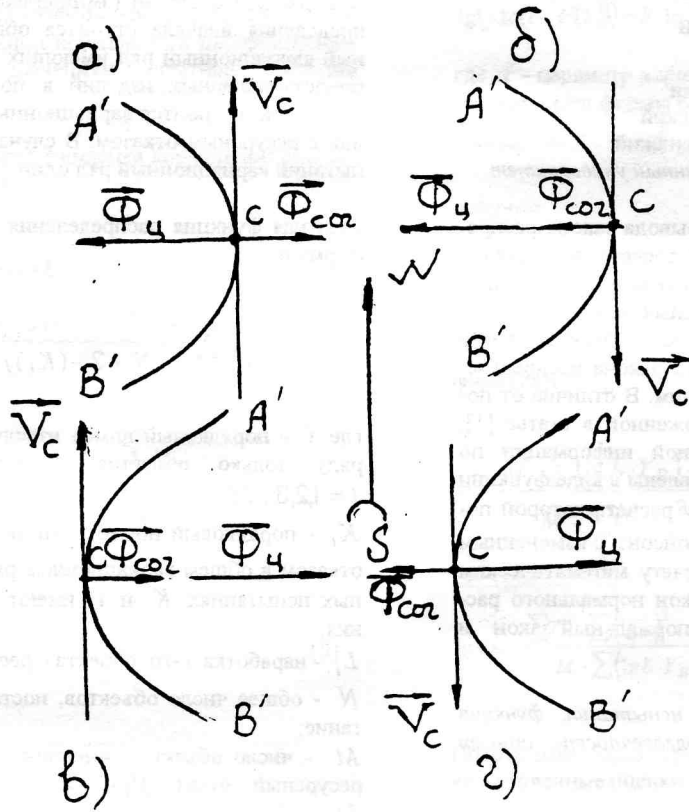


Рис. 2.