

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОДНОГО ПОТОКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЛОТА В УСЛОВИЯХ ПРОДЛЕННОЙ НАВИГАЦИИ

В статье рассмотрены основные закономерности движения водного потока при движении плота в условиях продленной навигации. Исследовано влияние на скорость стесненного потока таких параметров, как шероховатость льда, ширина канала в ледовом поле и шероховатость русла.

**Ключевые слова:** сплав леса, продленная навигация, шероховатость льда, сжатый поток, скорость потока.

V.P. Korpachev, A.A. Zlobin, I.V. Korpachev

## WATER FLOW MOTION LAWS IN RAFT TRAFFIC IN THE CONDITIONS OF PROLONGED NAVIGATION

The basic water flow motion laws in raft traffic in the conditions of the prolonged navigation are described in the article. The influence of such parameters as the ice roughness, the channel width in the ice field and the roughness of watercourse on the constrained flow speed is researched.

**Key words:** timber rafting; prolonged navigation; ice roughness, compressed stream, flow speed.

**Введение.** Современный уровень развития ледокольной техники позволяет организовать транспортировку лесоматериалов по рекам и водохранилищам в продленный период навигации. Продление навигации может быть обеспечено прокладкой каналов во льду в ранневесенний и осенний периоды навигации [3].

В связи с этим возникает необходимость аналитического и экспериментального исследования закономерностей движения водного потока, стесненного ледяным покровом при наличии в нем канала. При транспортировке плотов в ледовом канале необходимо учитывать дополнительное сопротивление воды от стеснения потока и ледового сопротивления.

**Цель исследований.** Определить формулу скорости потока в стесненном сечении с учетом влияния ледяного покрова при наличии в нем канала. Исследовать влияние на скорость стесненного потока таких параметров, как шероховатость льда, ширина канала в ледовом поле и шероховатость русла.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Выведем уравнение движения потока под ледяным покровом при наличии в нем канала [3]. Для вывода уравнения выделим сечениями 1-1 и 2-2 участок потока с уклоном  $i > 0$ , площадью живого сечения  $\omega$  и длиной  $l$ . Обозначим через  $P_1$  и  $P_2$  давление в центрах тяжести живых сечений (рис. 1).

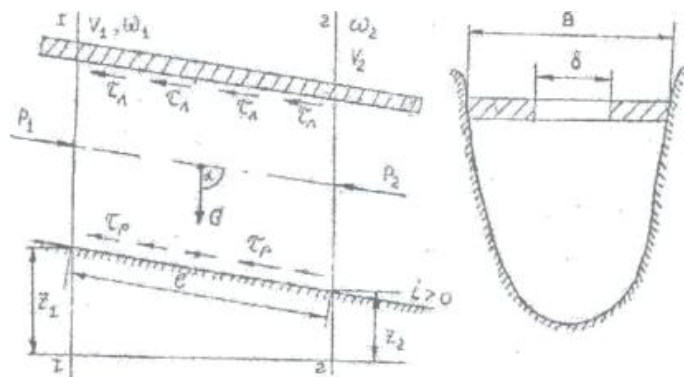


Рис. 1. Расчетная схема для вывода уравнения движения потока под ледяным покровом

Силы гидродинамического давления в сечениях 1-1, 2-2

$$F_1 = P_1 \omega_1, F_2 = -P_2 \omega_2. \quad (1)$$

Сила  $F_2$  направлена против направления движения, поэтому имеет знак минус.  
Сила трения потока о стенки русла

$$T_p = \tau_p \chi_p l, \quad (2)$$

где  $\tau_p$  – удельная сила трения потока о стенки русла, зависит от шероховатости русла;  
 $\chi_p$  – смоченный периметр русла.  
Сила трения потока о нижнюю поверхность ледяного покрова

$$T_n = \tau_n \chi_n l, \quad (3)$$

где  $\tau_n$  – удельная сила трения потока о нижнюю поверхность ледяного покрова;  
 $\chi_n$  – смоченный периметр ледяного покрова.  
Сила тяжести отсека

$$G = \rho g \omega l. \quad (4)$$

Спроектируем действующие силы на ось движения потока

$$F_1 - F_2 + G \cos \alpha - T_p - T_n = 0. \quad (5)$$

Подставив значение действующих сил в уравнение (5) и разделив все члены уравнения на  $\rho g \omega$ , получим

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = \frac{\tau_p \chi_p l}{\rho g \omega} + \frac{\tau_n \chi_n l}{\rho g \omega}. \quad (6)$$

Запишем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{\rho g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{\rho g} + z_2 + h_w, \quad (7)$$

где  $h_w$  – потери напора при движении потока на участке 1.  
Так как  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  и принимая  $\alpha_1 = \alpha_2$ , уравнение (7) примет вид

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = h_w. \quad (8)$$

Сопоставляя уравнения (6) и (8), получим

$$\frac{\tau_p \chi_p l}{\rho g \omega} + \frac{\tau_n \chi_n l}{\rho g \omega} = h_w. \quad (9)$$

Введем в уравнение (6) значение гидравлического уклона

$$\frac{\tau_p \chi_p}{\rho g \omega} + \frac{\tau_n \chi_n}{\rho g \omega} = I, \quad (10)$$

где  $\omega/\chi_n = R_n$  – гидравлический радиус смоченного периметра ледяного покрова;  
 $\omega/\chi_p = R_p$  – гидравлический радиус смоченного периметра русла.  
С учетом значений  $R_n$ ,  $R_p$  уравнение (10) запишется

$$\frac{\tau_p}{\rho g R_p} + \frac{\tau_n}{\rho g R_n} = I \quad (11)$$

или, введя отношение  $\alpha = \frac{R_n}{R_p}$ , получим

$$\frac{\tau_p}{\alpha \rho g} + \frac{\tau_n}{\rho g} = IR_n. \quad (12)$$

При условии развитого турбулентного движения можно предположить, что суммарные силы трения пропорциональны квадрату скорости движения потока при наличии ледяного покрова, то есть

$$\frac{\tau_p}{\alpha \rho g} + \frac{\tau_n}{\rho g} = K v_n^2, \quad (13)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  
 $v_n$  – скорость движения потока при наличии ледяного покрова и канала в нем.  
 Из уравнений (12) и (13) следует

$$IR_n = K v_n^2, \quad (14)$$

откуда

$$v_n = \sqrt{\frac{1}{K}} \sqrt{IR_n} = c_n \sqrt{IR_n}, \quad (15)$$

где через  $c_n$  обозначили коэффициент Шези для потока с ледяным покровом и наличием в нем канала.

Определим скорость движения потока для широкого прямоугольного русла при наличии канала во льду шириной  $b$ . Так как  $\omega = BH$  и  $\chi_n = 2(B+H) - b$ , то гидравлический радиус при наличии канала во льду равен

$$R_n = \frac{\omega}{\chi_n} = \frac{BH}{2(B+H) - b}. \quad (16)$$

Представим  $R_n$  в безразмерной форме, введя относительную глубину  $m = H/B$  и относительную ширину прорези канала  $m' = b/B$ . С учетом  $m$  и  $m'$  получим

$$R_n = \frac{mB}{2(1+m) - m'}. \quad (17)$$

Коэффициент Шези в формуле (15) может быть определен по формуле [1]

$$c_{np} = \frac{1}{n_{np}} H^{\frac{1}{6}} = \frac{c_p}{(1 + \alpha^{1.5})^{2/3}}, \quad (18)$$

где  $c_p$  – скоростной коэффициент свободного ото льда потока;  
 $n_{np}$  – приведенный коэффициент шероховатости для потока под ледяным покровом.

На основе сопоставления результатов расчета с данными натурных наблюдений рекомендуется применять формулу Н. Н. Павловского для определения  $n_{np}$  [3]

$$n_{np} = \frac{n_n \chi_n + n_p \chi_p}{\chi_n + \chi_p}. \quad (19)$$

В формуле (18)  $\alpha = n_n/n_p$ , где  $n_n$  – коэффициент шероховатости ледяного покрова;  $n_p$  – коэффициент шероховатости русла.

Для рек в бытовом состоянии Н. Н. Белокоп [1] рекомендует принимать значения коэффициента шероховатости ледяного покрова, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициента шероховатости ледяного покрова

Период ледостава	Расчетное значение
Первые 10 дней ледостава	0,150–0,050
10–20-й день после ледостава	0,100–0,040
20–60-й день после ледостава	0,050–0,030
60–80-й день после ледостава	0,040–0,015
80–110-й день после ледостава	0,025–0,010

Примечание. Верхние пределы указанных значений должны применяться в расчетах при образовании торосистого льда или шуги; нижние – на участках с гладким льдом.

Подставляя значение гидравлического радиуса  $R_h$  и коэффициента Шези  $C_h$  в формулу (15), получим скорость движения потока при наличии канала во льду

$$\vartheta_{\text{л}} = \frac{C_p}{(1 + \alpha^{1,5})^{2/3}} \sqrt{\frac{\text{Im}B}{2(1 + m) - m'}}, \quad (20)$$

или

$$\vartheta_{\text{л}} = \frac{1}{n_{\text{пр}}} H^{1/6} \sqrt{\frac{\text{Im}B}{2(1 + m) - m'}}. \quad (21)$$

Введем следующие обозначения (рис. 2):

- $\omega, u$  – площадь поперечного сечения потока, средняя скорость его течения, не стесненного судном;
- $\omega_c, u_c$  – площадь поперечного сечения потока, средняя скорость его течения, когда в нем находится судно с площадью миделевого сечения  $\pi$ ;
- $h, h_c$  – глубина потока соответственно в нестесненной его части перед носовой частью судна и в мидели.

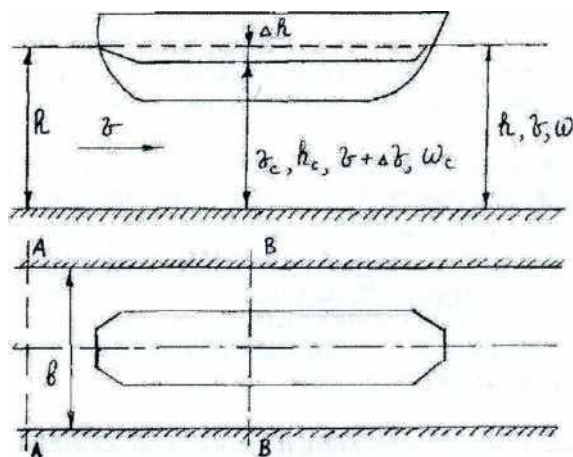


Рис. 2. Схема движения судна в ограниченных условиях

При движении плота на участках, ограниченных по ширине и глубине, в районе движения судна наблюдается понижение уровня. Для определения величины понижения уровня воды в районе нахождения плота воспользуемся принципом подвижных координат, соединенных с судном [3]. В зоне расположения судна, вследствие уменьшения площади живого сечения потока поперечным сечением корпуса судна, скорость течения увеличивается на некоторую величину  $\Delta u$ . Скорость в стесненном сечении потока  $u_c = u + \Delta u$ .

Для определения скорости  $u_c$  воспользуемся уравнением Бернулли, записанным для сечений AA и BB

$$h + \frac{u^2}{2g} = (h - \Delta h) + \frac{u_c^2}{2g}. \quad (22)$$

Для определения  $u_c$  необходимо установить величину понижения уровня воды  $\Delta h$  в сечении BB. Величина  $\Delta u$  может быть приближенно определена из уравнения неразрывности

$$u\omega = (u + \Delta u)\omega_c. \quad (23)$$

Площадь потока, стесненного судном, определится выражением

$$\omega_c = \omega - \alpha - b\Delta h, \quad (24)$$

где  $\alpha$  – площадь погруженной части корпуса судна по мидельшпангоуту;

$b$  – средняя ширина канала, вычисляемая по выражению  $b = \omega/h$ .

Считая произведение  $\Delta h b$  малым по сравнению с площадью  $\omega$ , им можно пренебречь. Тогда, подставляя (24) в (23) и решая относительно  $\Delta u$ , получим

$$\Delta u = u \frac{\alpha}{\omega - \alpha} = n \frac{1}{n - 1}, \quad (25)$$

где  $n = \omega/\alpha$  – профильный коэффициент.

Зная значение  $\Delta u$ , можно определить теоретическую величину понижения уровня воды  $\Delta h$ , воспользовавшись для этого уравнением (22). Подставляя в уравнение (22) значение  $u_c = u + \Delta u$  и решая относительно  $\Delta h$ , получим

$$\Delta h = \frac{1}{g} \left( u + \frac{\Delta u}{2} \right) \Delta u. \quad (26)$$

Подставляя значение  $\Delta u$  (25) в формулу (26), получим

$$\Delta h = \frac{u^2}{g} \frac{n - 0,5}{(n - 1)^2}. \quad (27)$$

Для практических расчетов для определения величины  $\Delta h$  рекомендуется формула, учитывающая не только изменение формы поперечного сечения, но и характер обтекания корпуса судна [3]

$$\Delta h = \left[ 1 - K^2 \left( \frac{n - 1}{n} \right)^2 \right] \frac{u^2}{2g}, \quad (28)$$

где  $K^2 = 1 - \frac{1}{\sqrt{n-4,2}}$ .

Значение скорости потока в стесненном сечении с учетом величины  $\Delta h$  получим из уравнения (22)

$$u_c = u \sqrt{2 - K^2 \left( \frac{n - 1}{n} \right)^2}. \quad (29)$$

Значение скорости потока в стесненном сечении с учетом влияния ледяного покрова при наличии в нем канала получим, подставив в уравнение (29)  $u_n$

$$u_n^c = \frac{1}{n_{np}} H^{1/6} \sqrt{\frac{ImB}{2(1+m)-m'}} \sqrt{2 - K^2 \left( \frac{n-1}{n} \right)^2}. \quad (30)$$

Исследуя выведенную формулу (30), можно определить, как влияют на скорость потока  $u_n^c$  такие показатели, как  $b$ ,  $n_l$ ,  $n_p$ . Сравним значения средней скорости потока  $u$ , вычисленной по формуле Шези (31), со значениями скорости потока в стесненном сечении в условиях продленной навигации  $u_n^c$ .

$$u = C\sqrt{RI} \quad (31)$$

В качестве постоянных параметров примем средние показатели для Ангара-Енисейского региона:  $L \times B \times T$  – габаритные размеры плота, соответственно длина, ширина и осадка,  $500 \times 22 \times 0,75$  м;  $B_p$  – ширина русла реки, 400 м;  $H$  – глубина потока, 1,5 м.

Результаты расчетов влияния  $n_l$  на  $u_n^c$  представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Расчет влияния  $n_l$  на  $u_n^c$ 

№ п/п	$n_l$	$\chi_l, m^2$	$n_{np}$	$m'$	$u, m/c$	$u_l, m/c$	$u_n^c, m/c$	$\Delta_l(n_l) = 1 - \frac{v-v_n^c}{v}$
1	0,01	366	0,04	0,085	0,65	0,77	0,89	1,40
2	0,03		0,05			0,62	0,71	1,12
3	0,07		0,07			0,44	0,51	0,80
4	0,1		0,08			0,37	0,42	0,66
5	0,15		0,11			0,28	0,33	0,51

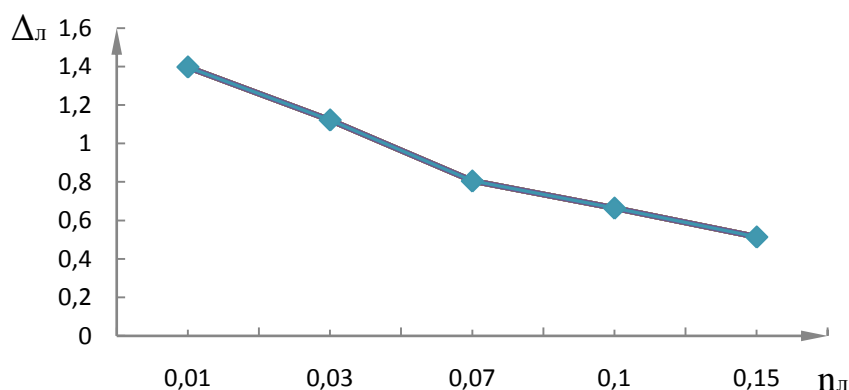


Рис. 3. Влияние шероховатости льда на скорость потока в условиях продленной навигации

При изменении шероховатости льда от 0,01 до 0,15 скорость стесненного потока уменьшается на 36,4 %. Результаты расчетов влияния  $b$  на  $u_n^c$  представлены в таблице 3 и на рисунке 4.

Таблица 3

Расчет влияния  $b$  на  $u_n^c$ 

№ п/п	$B, m$	$\chi_l, m^2$	$n_{np}$	$m'$	$u, m/c$	$u_l, m/c$	$u_n^c, m/c$	$\Delta_l(n_l) = 1 - \frac{v-v_n^c}{v}$
1	26	374	0,07	0,07	0,65	0,44	0,51	0,800
2	30	370	0,07	0,08		0,44	0,51	0,803
3	34	366	0,07	0,09		0,44	0,51	0,805
4	38	362	0,07	0,10		0,44	0,51	0,807
5	42	358	0,07	0,11		0,45	0,51	0,809

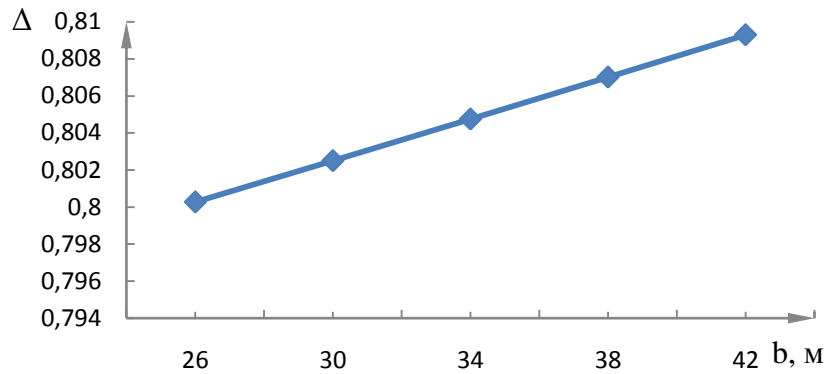


Рис. 4. Влияние ширины канала на скорость потока в условиях продленной навигации

При изменении ширины канала в ледовом поле от 26 до 42 м при ширине плота 22 м скорость сжатого потока увеличится на 1,12 %.

Результаты расчетов влияния  $n_p$  на  $u_{л}^c$  представлены в таблице 4 и на рисунке 5.

Таблица 4

Расчет влияния  $n_p$  на  $u_{л}^c$ 

№ п/п	$n_p$	$n_{пр}$	$m'$	$u$ , м/с	$u_{л}$ , м/с	$u_{л}^c$ , м/с	$\Delta(n_{л}) = 1 - \frac{v-v_{л}^c}{v}$
1	0,025	0,05	0,085	1,65	0,64	0,74	0,45
2	0,045	0,06		0,91	0,52	0,60	0,66
3	0,065	0,07		0,64	0,44	0,51	0,80
4	0,085	0,08		0,49	0,38	0,44	0,91
5	0,105	0,09		0,39	0,34	0,39	0,99

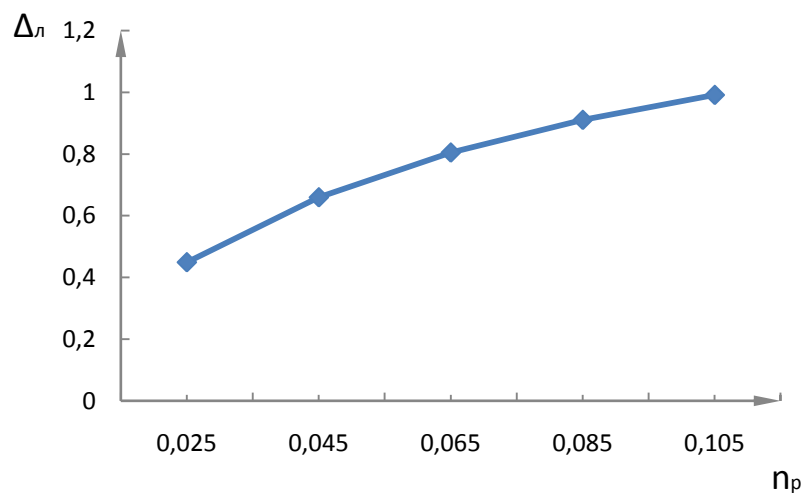


Рис. 5. Влияние шероховатости русла на скорость потока в условиях продленной навигации

При изменении шероховатости русла от 0,025 до 0,105 скорость сжатого потока увеличится в два раза.

**Выводы.** Основное влияние на изменение скорости потока в условиях продленной навигации оказывают шероховатость льда и шероховатость русла. Полученные расчетные данные и зависимости могут быть

использованы при определении сопротивления воды движению лесотранспортных единиц и судов в условиях продленной навигации

### Литература

1. Белоконь П.Н. Инженерная гидравлика потока под ледовым покровом. – М.: Госэнергоиздат, 1940. – 159 с.
2. Звонков В.В. Судовые тяговые расчеты. – М.: Речной транспорт, 1956. – 324 с.
3. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса. – М.: Изд-во Акад. естествознания, 2009. – 237 с.



УДК 631.354.2

С.Д. Шепелёв, И.Н. Кравченко

### ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСНАЩЁННОСТИ ПОСЕВНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЕВОДСТВА

*В условиях недостаточного уровня ресурсного потенциала растениеводческой отрасли определена взаимосвязь технического оснащения между посевными и зерноуборочными процессами. Выявлено влияние количественного и качественного состояния зерноуборочных комбайнов на потребное количество посевных агрегатов.*

**Ключевые слова:** моделирование, посев, уборка, экономическая эффективность.

S. D. Shepelyov, I.N.Kravchenko

### SOWING PROCESSES TECHNICAL EQUIPPING SUBSTANTIATION IN THE CONDITIONS OF PLANT GROWING INSUFFICIENT RESOURCES POTENTIAL

*The interrelation between sowing and grain-harvesting processes technical equipping in the conditions of plant growing insufficient resource potential is defined in the article. The influence of quantitative and qualitative combine harvesters characteristics on the sowing units necessary number is revealed.*

**Key words:** modeling, sowing, harvesting, economic efficiency.

---

**Введение.** В условиях снижения ресурсного обеспечения растениеводческой отрасли необходимо найти резервы повышения эффективности посевных и зерноуборочных процессов. Анализ функционирования механизированных процессов показывает, что сложившаяся теория машиноиспользования не учитывает в полной мере их взаимовлияние. Посев зерновых культур в соответствии с нормативными показателями рекомендуется проводить в сжатые сроки для получения максимальной урожайности, однако в условиях низкой технической оснащённости сельскохозяйственного производства это приводит к значительным потерям продукции из-за несвоевременной уборки и недоиспользованию потенциала машин. Решение этой проблемы требует теоретического обоснования согласованности параметров посевных и уборочных комплексов, установления взаимовлияния динамики созревания культур и технического оснащения уборочных процессов.

Проблемность ситуации заключается в том, что, с одной стороны, в условиях недостаточного уровня технического оснащения механизированных процессов в растениеводстве и дефицита трудовых ресурсов необходимо обеспечить своевременное проведение уборочных и посевных работ с целью снижения потерь продукции и её себестоимости за счёт согласования параметров механизированных процессов уборки и посева, с другой стороны, отсутствие знаний о взаимосвязи и закономерностях функционирования механизированных процессов посева и уборки зерновых культур не позволяет обеспечить высокую эффективность производства.