

С. Ф. Рапинчук

### ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ВЫСТУПОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПУЧКОВЫХ И ПЛОСКИХ ПЛОТОВ

В настоящее время принято считать, что полное сопротивление воды движению плотов состоит из трех составляющих: сопротивления формы, сопротивления трения и сопротивления волнового. Многие исследователи показывают, что для плотов, буксируемых по большим рекам и озерам со скоростями 1,0—1,5 м/сек, волновое сопротивление практически отсутствует. Поэтому общее сопротивление воды движению плота может быть выражено зависимостью

$$R = R_f + R_{\phi},$$

где  $R$  — общее сопротивление плота;

$R_f$  — сопротивление трения;

$R_{\phi}$  — сопротивление формы.

Для раскрытия этой зависимости, т. е. для определения величины составляющих общего сопротивления и выявления влияния режима движения на коэффициент сопротивления трения, нами были проанализированы имеющиеся в литературе материалы по определению сопротивления воды движению плотов. Были использованы экспериментальные материалы многих авторов (Г. М. Черкасова, Н. А. Хахина, М. М. Солодухина, Н. И. Шаралова, В. Н. Худоногова) и теоретическое определение сопротивления шероховатой пластины при обтекании ее жидкостью, выполненное Прандтлем и Шлихтингом. Плот нами уподоблен шероховатой пластине, поэтому основные положения Прандтля и Шлихтинга, разработанные ими для пластинки, использованы нами при анализе величины коэффициента сопротивления трения плотов. Обтекание плота пластинки при его буксировке обычно происходит при режиме, при котором стенка-плот не является гидравлически гладкой.

При обтекании жидкостью шероховатой пластины различают абсолютную шероховатость  $K$  и относительную  $\frac{k}{\delta}$ , где  $k$  — высота выступов,  $\delta$  — толщина пограничного слоя. Относительная шероховатость  $\frac{k}{\delta}$  уменьшается по мере удаления от передней кромки пластины, так как толщина пограничного слоя увеличивается вниз по течению. Это обстоятельство приводит к тому, что передняя и задняя части пластины-плота ведут себя неодинаково в отношении сопротивления, вызываемого шероховатостью.

Если принять для простоты, что пограничный слой становится турбулентным, начиная с передней кромки пластины, тогда в передней ее части, где отношение  $\frac{k}{\delta}$  велико, наблюдается некоторый участок с режимом полного проявления шероховатости. Дальше будет следо-

вать так называемый переходный участок и, наконец, еще дальше — если только пластина имеет достаточно большую длину — участок с режимом без проявления шероховатости. Границы между указанными участками определяются значениями безразмерной шероховатости

$$\frac{v \cdot K_s}{\nu}$$

где  $v$  — динамическая скорость;

$K_s$  — размер зерна эквивалентной песочной шероховатости;

$\nu$  — кинематическая вязкость.

Для удобства использования полученных зависимостей Прандтлем и Шлихтингом предложен график, на котором изображена зависимость коэффициента полного трения  $C_f$  от числа Рейнольдса  $Re = \frac{U \infty l}{\nu}$ , причем в качестве параметра взято отношение  $\frac{l}{K_s}$ . Кроме того, на графике проведено семейство кривых с параметром  $\frac{U \infty K_s}{\nu}$ . Смысл семейства кривых следующий: если для заданной пластинки скорость изменяется, то отношение  $\frac{l}{K_s}$  остается постоянным и изменение сопротивления происходит по кривой  $\frac{l}{K_s} = \text{const}$ ; если же изменяется длина пластинки, то остается постоянным отношение  $\frac{U \infty K_s}{\nu}$  и изменение сопротивления происходит по кривой  $\frac{U \infty K_s}{\nu} = \text{const}$ . График построен в предположении, что пограничный слой становится турбулентным, начиная с передней кромки пластины.

Для режима с полным проявлением шероховатости зависимость коэффициента полного трения от относительной шероховатости может быть также представлена посредством интерполяционной формулы

$$C_f = \left[ 1,89 + 1,62 \lg \left( \frac{l}{K_s} \right) \right]^{2,5}$$

Для сопоставления опытных данных с теоретическими вычислялся коэффициент полного трения на опытных данных и наносился на график Прандтля — Шлихтинга для шероховатой пластины.

Вычисление данных для нанесения на график Прандтля — Шлихтинга производилось в следующем порядке:

1. Определение сопротивления формы. Сопротивление формы может быть найдено из зависимости

$$R_{\phi} = C_{\phi} B T v^n,$$

где  $C_{\phi}$  — коэффициент сопротивления формы;

$B, T$  — соответственно ширина и осадка плота, м;

$n$  — показатель степени; в расчетах использованы значения  $n = 1,83$ ,  $n = 2$  и  $n = 2,15$ , т. е. такие, как рекомендуют брать авторы формул;

$v$  — скорость буксировки, м/сек.

Должного обоснования величины коэффициента  $C_{\phi}$  в литературе не имеется. В существующих формулах он изменяется от 35 до 77,5. Поэто-

му при определении сопротивления формы  $R_{\phi}$  значения коэффициента сопротивления формы  $C_{\phi}$  принимались равными:  $C_{\phi} = 35$ ;  $C_{\phi} = 50$ ;  $C_{\phi} = 77,5$ , т. е. такими, какими их рекомендуют брать авторы формул.

2. Определение сопротивления трения. Сопротивление трения может быть определено как разность общего сопротивления воды движению плота  $R$  (измеренного в опыте) и сопротивления формы  $R_{\phi}$ , т. е.

$$R_f = R - R_{\phi}.$$

3. Определение коэффициента сопротивления полного трения  $C_f$ :

$$C_f = \frac{R_f}{\frac{\rho}{2} BLv^2},$$

где  $\rho$  — плотность воды, в расчетах принято  $\rho = 102 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ ;  
 $L$  — длина плота, м.

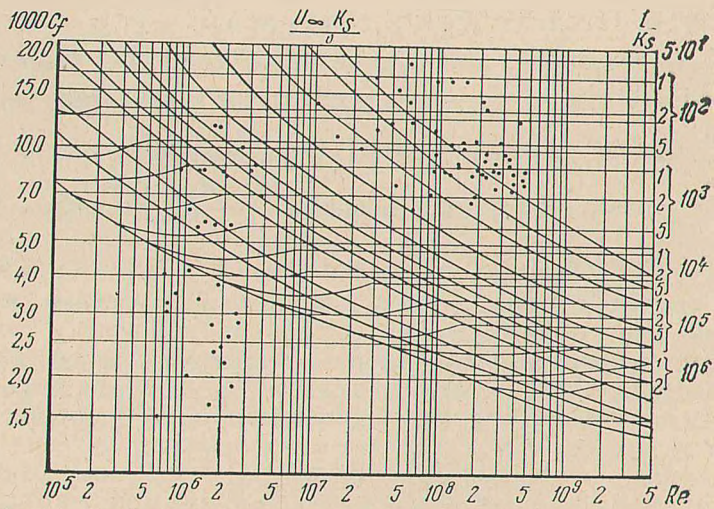


Рис. 1. График связи опытных значений коэффициента сопротивления трения  $C_f$  с числом Рейнольдса  $Re$  для плотов при коэффициенте сопротивления формы 77,5 и показателе степени у скорости  $n = 2$ .

Значения остальных величин приведены выше.

4. Определение числа Рейнольдса. Числа Рейнольдса для всех плотов вычислялись как для пластин, т. е.

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}.$$

Таким образом проведена обработка 125 плотов. Полученные значения коэффициентов сопротивления полного трения в зависимости от числа Рейнольдса и принятого коэффициента сопротивления формы нанесены на график Прандтля и Шлихтинга (рис. 1—4).

Анализ графиков с нанесенными коэффициентами сопротивления полного трения показывает, что при буксировке плотов могут иметь место три зоны движения: гидравлически гладкая, переходная и квадратичная. Следовательно, единой формулы для определения коэффициента

полного трения быть не может. В зависимости от зоны движения он будет функцией числа Рейнольдса  $Re$  и высоты выступов абсолютной шероховатости  $K$ . В связи с этим при расчете коэффициентов сопротивления

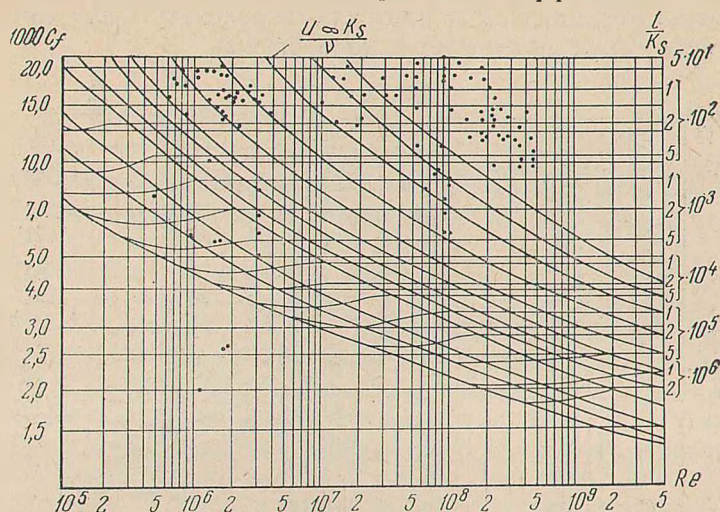


Рис. 2. График связи опытных значений коэффициента сопротивления трения  $C_f$  с числом Рейнольдса  $Re$  для плотов при коэффициенте сопротивления формы 35 и показателе степени у скорости  $n = 2$ .

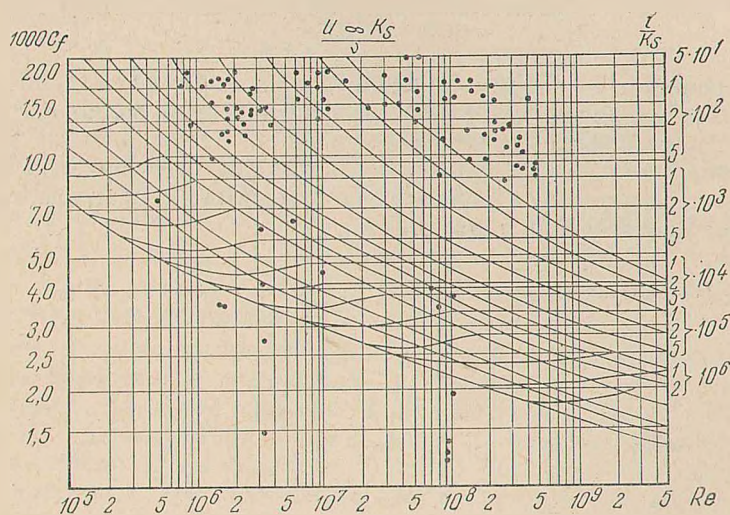


Рис. 3. График связи опытных значений коэффициента сопротивления трения  $C_f$  с числом Рейнольдса  $Re$  для плотов при коэффициенте сопротивления формы 50 и показателе степени у скорости  $n = 2,15$ .

ния полного трения необходимо иметь возможность переходить от натурной шероховатости плотов к равномерной песочной шероховатости.

Некоторыми исследователями влияние шероховатости не учитывается при определении сопротивления трения воды движению плотов.

Другие, рассматривая плот как гладкую пластину, вводят дополнительный коэффициент на шероховатость. Дается его приближенное значение по аналогии с судами. За шероховатость у этих авторов принята коря бревен. Третьи рассматривают плот как шероховатую пластину, но за шероховатость также принимается кора бревен.

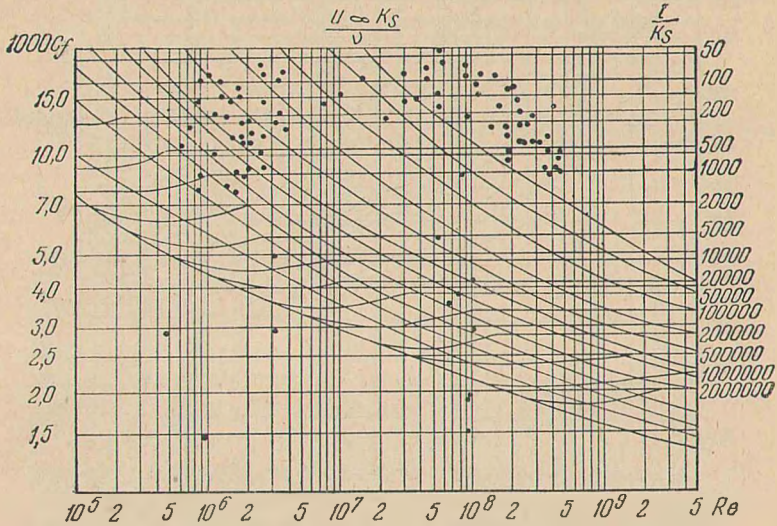


Рис. 4. График связи опытных значений коэффициента сопротивления трения  $C_f$  с числом Рейнольдса  $Re$  для плотов при коэффициенте сопротивления формы 50 и показателе степени у скорости  $n = 2$ .

Из графиков 1—4 нами определена и по формуле интерполяционной проверена эквивалентная равнoзернистая песочная шероховатость для пучковых плотов. Она соизмерима с осадкой плота, поэтому можно полагать, что у плотов за шероховатость должна быть принята не высота выступов коры бревен, а величина, соизмеримая с осадкой плотов или какими-то другими его параметрами.