

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.124

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В БИТЫХ ЛЬДАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен уточненный метод пересчета сопротивления битого льда с модели на натуре с учетом плотности воды и льда.

Ключевые слова: ледовые условия, сопротивление, битые льды, судно, физико-механические характеристики.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают практически невозможным достаточно точно и определенно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку. Однако это обстоятельство не снимает актуальности вопроса оценки ледовых качеств судов в битых льдах. По-прежнему судостроителей волнует вопрос ледового сопротивления в этих условиях. Для описания ледовой обстановки и ее связи с ледовым сопротивлением вводят понятие «стандартных ледовых условий», позволяющих в некоторой степени однозначно зафиксировать ледовые условия относительно наиболее важных параметров, влияющих на ледовое сопротивление. К ним следует отнести природные мелкобитые льды и битые льды в каналах, образованных после похода ледокола в сплошном ледяном покрове.

При регламентации условий ледового плавания Российским морским регистром судоходства используются следующие определения [4]:

- сплоченность – мера сплошности ледяного покрова, характеризуемая отношением площади, занимаемой льдами, к общей площади рассматриваемого участка акватории (оценивается по 10-балльной шкале);
- разреженный лед – лед сплоченностью 4-6 баллов, в котором большинство льдин не соприкасаются между собой;
- сплоченный лед – лед сплоченностью 7-8 баллов, в котором большинство льдин соприкасаются между собой;
- очень сплоченный лед – лед, сплоченность которого равна или более 9 баллов, но менее 10 баллов;
- сплошной лед – лед сплоченностью 10 баллов.

Лед также характеризуется толщиной.

Российский речной регистр характеризует битые льды только толщиной [4].

Очевидно, что такое описание ледовых условий нельзя признать достаточным для адекватной оценки ледовой ходкости.

Мелкобитые льды принято характеризовать: толщиной h – средняя толщина плавающих льдин, как правило, равная толщине разрушенного ледяного покрова за счет ветра, волнения или после прохода ледокола; сплоченностью S – отношение площади, покрытой льдом, ко всей площади поверхности участка водоема. При анализе ледового сопротивления

к ним присоединяют: плотность льда ρ_l – масса льдины, отнесенная к ее объему; коэффициент трения f пары лед – наружная обшивка корпуса судна. Для описания ледовых каналов к характеристикам ледовых условий добавляют ширину канала B_k . Заметного разрушения льдин при контактах между собой и корпусом не происходит, поэтому прочие физико-механические характеристики льда принято не включать в рассмотрение.

В настоящее время существуют созданные различными авторами методы расчета сопротивления в битых льдах [1, 2]. В них учитываются главные размерения, некоторые характеристики формы корпуса судна, скорость хода и перечисленные параметры битого льда. Определяя основные взаимосвязи, они не могут в достаточной мере, отразить стереометрию взаимодействия корпуса судна со льдом.

Устоявшимся считается разделение ледового сопротивления $R_{л}$ на чистое ледовое сопротивление $R_{чл}$ и сопротивление воды $R_{в}$: $R_{л} = R_{чл} + R_{в}$. При этом чистое ледовое сопротивление разделяют на независимое от скорости v , так называемое прямое сопротивление $R_{п}$, и скоростное сопротивление $R_{ск}$: $R_{чл} = R_{п} + R_{ск}$. Сопротивление воды принято определять обычными методами и считать его независимым от чистого ледового сопротивления $R_{чл}$.

С физической точки зрения *прямое сопротивление* связывают с затратами энергии на притапливание льдин корпусом судна, а *скоростное сопротивление* – с динамическими процессами страгивания льдин при контакте с корпусом и их раздвигания в воде корпусом судна. Во всех случаях контакта льдин с корпусом возникают сопутствующие силы трения.

Картина взаимодействия корпуса судна с битым льдом существенно зависит от его сплоченности.

Так, например, для льда сплоченностью 10 баллов взаимодействие можно представить следующим образом. Льдины, взаимодействуя с корпусом, поворачиваются, притапливаются и раздвигаются, следуя обводам подводной части корпуса ледокола. Траектория движения льдин существенно зависит от формы корпуса. Практически весь сломанный лед попадает под корпус, образуя в его подводной части ледяную «рубашку». Облегание притопленным льдом подводной части корпуса происходит на значительном расстоянии от форштевня по длине судна и вниз от действующей ватерлинии. Ширина контакта обшивки с льдинами по периметру шпангоута с каждого борта равна, примерно, полуширине ледовой ватерлинии в соответствующем районе по длине судна (рис. 1). Между зонами облегания льда правого и левого борта образуется разрыв в ледяной рубашке. В носовой части судна обломки льда образуют оболочку, плотно прилегающую к наружной обшивке. Лед в данном районе корпуса прижимается к обшивке силами его плавучести и гидродинамическими силами, поскольку внешняя нормаль к наружной обшивке составляет острый угол с направлением движения. В кормовой части плотность оболочки уменьшается за счет противоположного действия гидродинамических сил. При приближении к корме возможны отрывы ледяной оболочки. Устойчивость ледяной оболочки особенно в кормовой оконечности зависит от формы корпуса подводной части и скорости движения судна. Пройдя наиболее широкую часть корпуса судна, часть льда всплывает по бортам, а часть остается под днищем и попадает в винты. После прохождения судна практически весь лед всплывает в канале, засоряя его до 9-10 баллов.

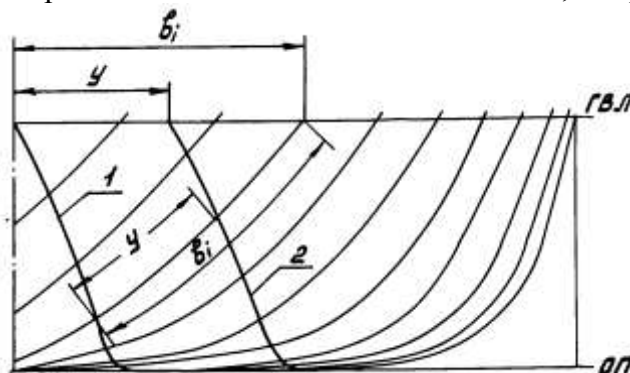


Рис. 1. Схема облегания корпуса обломками льда:

1 – нижняя граница ледяной «рубашки»; 2 – траектория движения льдины)

При движении судна в разреженных битых льдах льдины поворачиваются, притапливаются и раздвигаются. Взаимодействие с корпусом, за счет меньшего стеснения льдин, происходит в районе действующей ватерлинии, лед практически не попадает под корпус. При промежуточных значениях сплоченности 6–9 баллов имеет место переходная картина взаимодействия, существенно зависящая от скорости хода.

Существующие методы расчета чистого ледового сопротивления противоречат друг другу в количественном, а иногда и качественном плане, и часто не дают удовлетворительного, с точки зрения потребностей практики, ответа. В этой связи актуальными остаются экспериментальные методы определения ледового сопротивления.

Суть проведения испытаний, которая состоит в использовании в качестве моделей льда материалов, удовлетворяющих критериям подобия.

Анализ природы действующих на судно сил и условий их подобия позволил установить, что для моделирования движения в битых льдах необходимо выполнить следующие условия:

- форма корпуса модели должна быть геометрически подобной натурному судну. Масштаб геометрического подобия λ ;
- число Фруда одинаково для модели и натуре $Fr = idem$;
- сплоченность льда одинакова для модели и натуре $S = idem$;
- плотность воды и льда одинаковы для модели и натуре:

$$\rho_B = idem, \quad \rho_L = idem;$$

- коэффициент трения льда о корпус судна одинаков для модели и натуре $f = idem$;

При выполнении этих условий ледовое сопротивление натурного судна при движении в битых льдах можно определить пересчетом в соответствии с законом подобия Фруда по кубу масштаба λ^3 .

Требования критериев подобия технически может быть выполнено с разной степенью точности, что в свою очередь значительно влияет на результаты прогноза натурального сопротивления.

Геометрическое подобие модели может быть выполнено и проверено с достаточной точностью.

Коэффициент трения льда о корпус регулируется покрытием поверхности модели и выполняется с необходимой точностью.

Сплоченность льда обычно определяется суммарной площадью размещаемых льдин, а равномерность их распределения по поверхности бассейна – ответственностью руководителя испытаний, но может контролироваться с помощью фотографирования.

Соответствие плотностей воды и льда натурным условиям должны быть подвергнуты дополнительному анализу, который удобно выполнить для наиболее регулярных условий битого льда 10-балльной сплоченности.

Сопротивление битого льда можно представить в виде

$$R_o = R_n + R_u + R_2, \quad (1)$$

где R_n - сопротивление, обусловленное плавучестью льдин;

R_u - инерционная составляющая сопротивления;

R_2 - гидродинамическая часть сопротивления, связанная с сопротивлением воды движению льдин.

На элемент обшивки $d\Omega$, взаимодействующий с льдинами, действуют нормальное усилие dN , обусловленное перечисленными составляющими, и касательное усилие dF , обусловленное трением льда.

Применяя принцип суперпозиции, можно записать

$$dN = dN_n + dN_u + dN_2. \quad (2)$$

Если считать, что трение обшивки о лед подчиняется закону Кулона-Амонтона, то

$$dF = fdN, \quad dF_{n,u,z} = fdN_{n,u,z}. \quad (3)$$

Рассмотрим последовательно каждую составляющую сопротивления льда.

Обозначим углы, характеризующие форму обводов корпуса некоторой точки судовой поверхности:

φ_1 - угол между касательной к батоксу и ОП;

φ_2 - угол между касательной к ватерлинии и ДП;

φ_3 - угол наклона шпангоута к вертикали.

Введем также направляющие косинусы нормали и некоторого касательного направления для произвольной точки судовой поверхности. Для краткости записи обозначим их:

$$n_x = \cos(\vec{n}, \vec{x}); n_y = \cos(\vec{n}, \vec{y}); n_z = \cos(\vec{n}, \vec{z});$$

$$\tau_x = \cos(\vec{\tau}, \vec{x}); \tau_y = \cos(\vec{\tau}, \vec{y}); \tau_z = \cos(\vec{\tau}, \vec{z}).$$

Отметим, что направляющие косинусы и углы наклона судовой поверхности аналитически связаны между собой с помощью следующих равенств:

$$n_x = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}}; \quad n_y = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}};$$

$$n_z = \frac{\operatorname{tg}\varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}}; \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_3}.$$

Нормальное усилие, действующее на элемент обшивки $d\Omega$, обусловленное плавучестью льда

$$dN_n = n_z dZ_n = n_z (\rho - \rho_n) gh d\Omega. \quad (4)$$

Проекция этих усилий dN_n и dF_n на направление движения (ось Ox):

$$dX_n = dN_n n_x + dF_n \tau_x. \quad (5)$$

Интегрируя (5) с учетом (4) и (3) по всей зоне облегаания корпуса льдом Ω_n , получим выражение для составляющей сопротивления, связанной с плавучестью льда

$$R_n = (\rho - \rho_n) gh \int_{\Omega_n} (n_z n_x + f n_z \tau_x) d\Omega. \quad (6)$$

При определении инерционной составляющей льдин учтем, что наиболее значительные ускорения льдины получают при первоначальном контакте корпуса со льдом. Поэтому приближенно можно считать, что инерционные силы приложены в районе действующей ватерлинии.

Изменение кинетической энергии элемента льда в момент контакта под действием элементарной силы, приложенной со стороны обшивки,

$$dN_u d\eta = K_2 + K_1, \quad (7)$$

где dN_u - нормальная инерционная сила, действующая на элемент ватерлинии;

$d\eta$ - перемещение вдоль нормали;

$K_2 + K_1$ - изменение кинетической энергии элемента льда.

Деля уравнение (7) на $d\eta$ и подставляя выражение для кинетической энергии, получим

$$dN_u = \frac{c_u}{d\eta} \cdot \frac{m(v_{N_2}^2 - v_{N_1}^2)}{2}, \quad (8)$$

где m - масса элемента льда;

v_{N_1} и v_{N_2} - скорости элемента льда до и после контакта;

c_u - безразмерный коэффициент, учитывающий присоединенные массы воды.

Пусть приращение скорости льда происходит скачкообразно в районе КВЛ от нуля до скорости, обусловленной скоростью судна, тогда

$$v_{N_1} = 0; \quad v_{N_2} = vn_x. \quad (9)$$

Массу элемента льда представим в виде

$$m = \rho_l h dx dy. \quad (10)$$

Выразим нормальное перемещение обшивки $d\eta$ через поступательное перемещение судна dx :

$$d\eta = dx n_x. \quad (11)$$

Подставляя (9), (10) и (11) в (8), получим

$$dN_u = c_u h \frac{\rho_l v^2}{2} n_x dy. \quad (12)$$

Проецируя инерционные и сопутствующие силы трения на направление движения и интегрируя по ширине носовой ветви КВЛ,

$$R_u = \rho_l h v^2 \int_0^{B/2} c_u (n_x^2 + f n_x \tau_x) dy. \quad (13)$$

Нормальное гидродинамическое усилие, действующее на элемент "ледяной рубашки" и передаваемое на корпус судна, может быть определено по формуле

$$dN_z = c_z \frac{\rho v_N^2}{2} d\Omega = c_z \frac{\rho v^2}{2} n_x^2 d\Omega. \quad (14)$$

Касательную компоненту и суммарную проекцию гидродинамических сил, действующих на элемент льда, найдем по формулам (3) и (5).

Интегрируя по площади зоны контакта, определим

$$R_z = \rho v^2 \int_{\Omega_l} c_z (n_x^3 + f n_x^2 \tau_x) d\Omega. \quad (15)$$

В интегралы (6), (13) и (15) входит косинус угла между касательной к траектории движения льда в данной точке и направлением движения τ_x . Из наблюдений за движением льда относительно обшивки следует, что лед движется в направлении, составляющем минимальный угол с направлением движения какой только допускают обводы корпуса в данном районе. В частности, по плоскому днищу движение происходит приблизительно по батоксам, а по вертикальному борту по ватерлиниям.

Определим τ_x , используя направляющие косинусы внешней нормали. В силу ортогональности нормали \vec{n} и вектора $\vec{\tau}$, совпадающего по направлению с движением льда

$$n_x \tau_x + n_y \tau_y + n_z \tau_z = 0. \quad (16)$$

Кроме того,

$$\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2 = 1. \quad (17)$$

Подставляя τ_x , полученный из (16) в (17), получим уравнение, связывающее в неявной форме углы $(\vec{\tau}, \vec{x})$ и $(\vec{\tau}, \vec{y})$, определяющие направление касательной к траектории льдин в данной точке

$$F[(\vec{\tau}, \vec{x}), (\vec{\tau}, \vec{y})] = \tau_x^2 + \tau_y^2 + \left[\frac{n_x}{n_z} \tau_x + \frac{n_y}{n_z} \tau_y \right]^2 - 1 = 0. \quad (18)$$

В силу гладкости функции $(\vec{\tau}, \vec{x}) = f(\vec{\tau}, \vec{y})$ при повороте вектора $\vec{\tau}$ на касательной плоскости ее экстремум однозначно определится условием

$$\frac{d(\bar{\tau}, \bar{x})}{d(\bar{\tau}, \bar{y})} = \frac{\partial F / \partial(\bar{\tau}, \bar{y})}{\partial F / \partial(\bar{\tau}, \bar{x})}, \quad (19)$$

которое в развернутом виде приводит к уравнению

$$\tau_y^2 + \frac{n_y}{n_z} \left(\frac{n_x}{n_z} \tau_x + \frac{n_y}{n_z} \tau_y \right) = 0. \quad (20)$$

Совместное решение уравнений (20) и (18) определяет искомый τ_x зависимости от направляющих косинусов внешней нормали

$$\tau_x = \pm \sqrt{n_y^2 + n_z^2} = \pm \sqrt{1 - n_x^2}. \quad (21)$$

В обобщенном виде сопротивление битого льда, с точки зрения анализа влияния плотностей на результаты пересчета с модели на натуру, можно представить следующим выражением:

$$R = (\rho - \rho_{\text{л}}) F_1(h, n_x, n_z, \tau_x, f, \Omega_{\text{л}}) + \rho_{\text{л}} v^2 F_2(h, n_x, \tau_x, f, B) + \rho v^2 F_3(n_x, \tau_x, f, \Omega_{\text{л}}). \quad (22)$$

Очевидно, что подобие функций F_1 , F_2 , F_3 определяется геометрическим подобием и равенством коэффициентов трения модели и натуре. Соответствие плотностей воды и льда и их влияние на прогнозирование сопротивления натуре является предметом настоящего анализа.

При испытаниях моделей судов в битых льдах в настоящее время используются обычные (не ледовые) опытовые бассейны [1, 2, 3], наполненные пресной водой. Как показали исследования [1], наиболее подходящим материалом для имитации битого льда, получившим распространение в большинстве опытовых бассейнов, в настоящее время является полиэтилен высокого давления. Плотность этого материала $0,92 \text{ т/м}^3$. Таким образом, плотность воды и льда с большой точностью соответствует льду пресных водоемов. Для морского льда необходимо вводить коррективы. Во-первых, морская вода имеет большую плотность, а во-вторых, морской лед – меньшую плотность. Огромное противоречие прогнозов ледового сопротивления, по нашему мнению, является результатом игнорирования этих фактов. При этом нетрудно заметить, что составляющие прямого и скоростного сопротивления подлежат непосредственному экспериментальному разделению. Этот факт позволяет ввести коррективы в схему пересчета ледового сопротивления с учетом фактических плотностей воды и льда.

Прямое сопротивление пропорционально разности плотностей воды и льда $(\rho - \rho_{\text{л}})$. При плотностях морской воды и льда $1,025 \text{ т/м}^3$, $0,89 \text{ т/м}^3$ и пресноводных $1,000 \text{ т/м}^3$, $0,92 \text{ т/м}^3$ эта разница равна $0,175 \text{ т/м}^3$ и $0,080 \text{ т/м}^3$ соответственно. То есть прямое сопротивление при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза.

Скоростное сопротивление, разделяемое на инерционное и гидродинамическое, не позволяет экспериментальное разделение. Как видно из формулы (22), инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, будем полагать (до получения более достоверных данных) скоростное сопротивление пропорциональным плотности воды.

В заключение приведем пример пересчета ледового сопротивления судна-снабженца проекта 22450 ледового класса Arc 5. Модель в масштабе 1:60 испытывалась в плитках полиэтилена толщиной 20 мм при сплоченности 10 баллов в канале шириной 0,48 м.

Последовательность пересчета ледового сопротивления с модели на натуру выглядит следующим образом:

1. Скорость модели v_m .
2. Сопротивление модели R_m .

3. Число Фруда.
4. Скорость судна v_n .
5. Сопротивление воды модели R_B^M .
6. Чистое ледовое сопротивление модели $R_{chl}^M = R^M - R_B^M$.
7. Прямое ледовое сопротивление модели $R_{пр}^M (v \rightarrow 0)$
8. Скоростное сопротивление модели $R_{ск}^M = R_{chl}^M - R_{пр}^M$.
9. Прямое сопротивление судна $R_{пр}^H = R_{пр}^M \left(\frac{\rho^c - \rho_l^c}{\rho^n - \rho_l^n} \right) \lambda^3$.
10. Скоростное ледовое сопротивление судна $R_{ск}^H = R_{ск}^M \frac{\rho^c}{\rho^n} \lambda^3$.
11. Сопротивление воды судна R_B^H .
12. Полное сопротивление судна $R = R_{пр}^H + R_{ск}^H + R_B^H$.

Индексами «н» и «м» обозначены натура и модель, а индексами «п» и «с» пресный и соленый лед соответственно.

Результаты пересчета ледового сопротивления морского судна без учета поправок на плотность воды и льда и с учетом соответствующих поправок приведены на рис. 2.

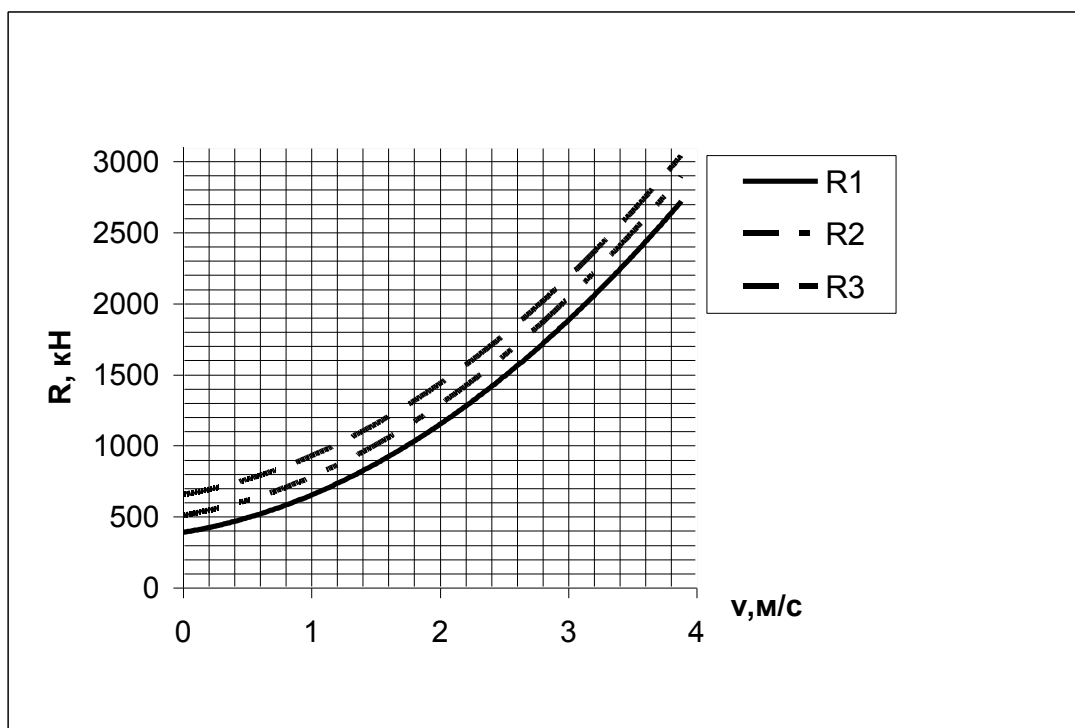


Рис. 2. Сопротивление натуры:

R_1 – без учета влияния плотности воды и льда;

R_2 – с учетом влияния плотности воды;

R_3 – с учетом влияния плотности воды и льда

Приведенные примеры прогнозирования сопротивления в битом льду с помощью модельных испытаний убедительно показывают необходимость учета поправок на плотность воды и льда

Библиографический список

1. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. **Рывлин, А.Я.** Испытания судов во льдах / А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980. – 207 с.
3. **Сазонов, К.Е.** Ледовая управляемость судов / К.Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2006. – 251 с.
4. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила. – СПб., 2008. Т. I.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A. Zuev, E.M. Gramuzov

PHYSICAL MODELING OF VESSEL MOTION IN BROKEN ICE

Refined methods of recalculation the resistance broken ice from the model to nature are considered. These methods are taking into account the density of water and ice.

Key words: ice conditions, resistance, broken ice, vessel, physical and mechanical characteristics.