

УДК 664.951. 002. 5

В.И. Погонец

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ВАКУУМНАЯ РАЗДЕЛКА РЫБ, ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ И РЕАЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Проведены теоретические и экспериментальные исследования вакуумной разделки мелких и средних по размерам рыб. Получены аналитические формулы, позволяющие рассчитать основные параметры для проведения процесса, а по выявленным экспериментальным данным построены графические зависимости. Предлагается методика проверки этих результатов (модели и реального процесса).

Ключевые слова: исследования, вакуумная разделка рыб, формулы, экспериментальные данные, методика, сравнение результатов.

V. I. Pogonets

VACUUM PROCESSING FISH, EVALUATION OF THE PARAMETERS OF THE MODEL AND THE REAL PROCESS

Carried out theoretical and experimental study of vacuum dressing small and medium sized fish. Analytical formulas allowing to calculate the main parameters for conducting the process, and identified the experimental data built graphics based on. A method is proposed to verify these results (model and the real process).

Key words: research, vacuum cutting fish, formulas, experimental data, methodology, results are compared.

По результатам выполненных исследований по вакуумной разделке рыб (сардины, корюшки, сайры, песчанки) нами [1, 2, 3] построена математическая модель процесса. Получено основное дифференциальное уравнение движения воздушного потока при вакуум-отсосе внутренностей рыб в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (1)$$

где V и U – соответственно продольная и нормальная к поверхности жгута внутренностей рыб составляющие скорости;

ν – кинематическая вязкость воздуха;

t – время;

y – нормальная к поверхности жгута координата.

В результате решения уравнения (1) с учетом начальных и граничных условий процесса получены аналитические выражения для усилий засасывания жгута внутренностей (2) и полного сопротивления отрыва кишечника из брюшной полости у рыб (3):

$$F_{\tau} = \frac{2\mu \cdot a \cdot l}{\sqrt{\pi \cdot \nu \cdot t}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}. \quad (2)$$

$$F_{\Sigma} = \frac{2\mu \cdot a \cdot l}{\sqrt{\pi \cdot v \cdot t}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} + \Delta P \cdot S, \quad (3)$$

где a – периметр жгута внутренностей;

l – длина выступающей части жгута внутренностей за пределы головного среза тушки рыбы;

S – площадь сечения жгута внутренностей в концевом сечении рабочей части вакуум-насадки.

Полученные данные экспериментальных работ по вакуум-отсосу внутренностей рыб для размерного состава 0,26–0,32 м приведены на рис. 1, здесь же показана рассчитанная теоретическая кривая для этого же размерного состава рыб.

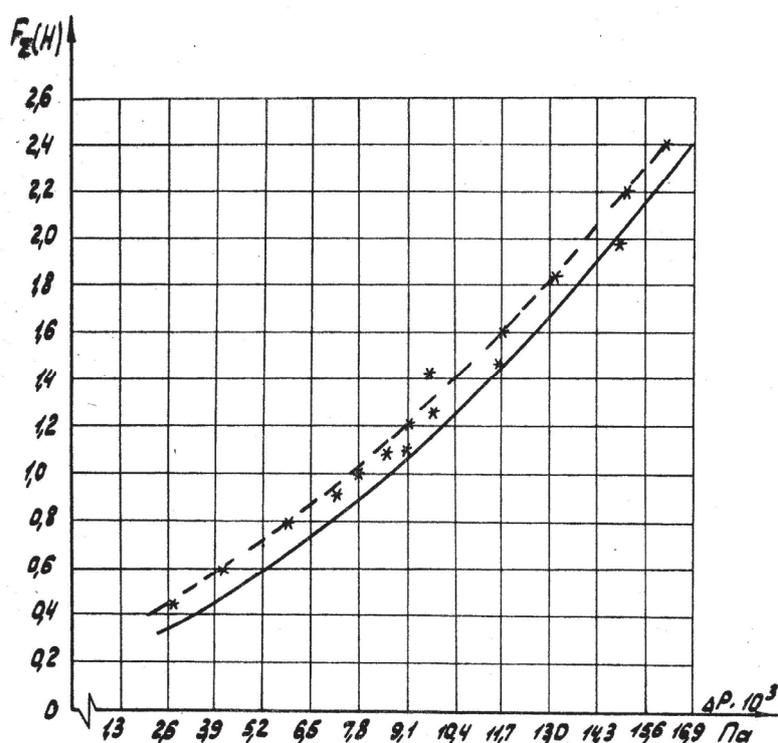


Рис. 1. Теоретическая (сплошная) и экспериментальная пунктирная характеристики сил отрыва внутренностей сайры при вакуум-отсосе для размерного состава 0,26–0,32 м

Fig. 1. Theoretical (solid) and experimental (dotted) characteristics of the detachment forces of the guts of saury during vacuum-suction for dimensional structure 0,26–0,32 m

По результатам выполненных работ была проведена проверка адекватности модели и реального процесса извлечения внутренностей из рыб по предлагаемой ниже методике. Для определения качества разделки рыбы в зависимости от технологических параметров были использованы следующие величины процесса: величина разрежения в вакуумной насадке ΔP , диаметр входного отверстия насадки d , время хранения сырья в аккумуляционном отделении t . По этим значениям был проведён метод активного планирования экспериментов [5, 6]. Ниже рассмотрим более полно эту методику.

При традиционном классическом подходе к исследованию опыты должны ставиться в некоторой последовательности так, чтобы при переходе от одного к другому изменялся

только один фактор (параметр), а все остальные остались бы на каком-то постоянном уровне. Поэтому в оценке каждого из результатов здесь участвует только малая часть опытов.

Основное преимущество предлагаемого метода активного планирования экспериментов заключается в том, что здесь опыты ставятся так, что одновременно изменяются все переменные. Поэтому каждое значение качества разделки рыбы определяется по результатам всех N экспериментов – дисперсия в оценке коэффициентов уравнения оказывается в N раз меньше дисперсии для ошибки опыта.

Изучение зависимости качества разделки рыбы C_1 от технологических параметров методом активного планирования в общем проводится в обычной последовательности большинства научных исследований. Оно проходит следующие этапы:

1. Постулирование математической модели.
2. Планирование эксперимента.
3. Выбор действительных технологических параметров.
4. Проведение эксперимента.
5. Оценка параметров.
6. Проверка адекватности постулированной модели.
7. Оценка доверительных интервалов.

Постулирование математической модели.

Задача исследования в том, чтобы получить функцию отклика:

$$C_1 = f(\Delta P, d, t).$$

Геометрический образ, соответствующий функции отклика, называется поверхностью отклика. В самом общем случае, когда исследование функции отклика ведётся при неполном знании механизма изучаемых явлений, аналитическое выражение функции отклика неизвестно. Поэтому приходится ограничиваться представлением её полиномом:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3. \quad (4)$$

В дальнейших рассуждениях вместо времени хранения рыбы в аккумуляционном отделении будем применять, для удобства, соответствующую силу связи F внутренностей с брюшной полостью.

Пользуясь результатами экспериментов, можно определить только выборочные коэффициенты регрессии.

Уравнение регрессии, полученное на основании опыта, запишется следующим образом:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + \epsilon. \quad (5)$$

Уравнение (5) является полиномом первой степени. Коэффициенты этого линейного уравнения можно легко оценить по методу наименьших квадратов, как будет показано далее.

Планирование эксперимента.

Дополнительно был проведён планированный эксперимент. План этого эксперимента является составным планом, первоначально предложенным Боксом [5]. Такой план состоит из 24 опытов в четырёх сериях, причём каждая серия состоит из 6 опытов.

В исследованиях [2, 3], проведённых в данных работах, применены только первые две серии опытов. Эти первые 12 опытов образуют обычную факторную схему порядка 2^3 с дополнительной центральной точкой, повторенной четыре раза. Размещение опытных точек показано условно на рис. 2, где номера точек соответствуют номерам опытов.

Первая серия была составлена из шести опытов: 2, 3, 5, 8, 9, 10. Используя эти 6 опытов, можно оценить 4 параметра в постулированном уравнении. Резервные точки в центре служат для оценки ошибки эксперимента, по которой можно оценить доверительные интервалы параметров, а следовательно, само качество разделки рыбы.

Вторая серия: 1, 4, 6, 7, 11, 12 – добавлена для получения лучших доверительных интервалов параметров.

Выбор уровней изменения технологических режимов.

План из 12 опытов предусматривает три уровня для каждой переменной. Выбор уровня был проведён с учётом работы вакуумной экспериментальной установки (скорости подачи сырья к вакуум-насадкам и режимов работы вакуумного насоса).

Пробные опыты показали, что диаметры цилиндрических насадок целесообразно принимать в пределах до 0,16 м. Дальнейшее увеличение диаметра насадок приводит к резкому ухудшению обработки брюшной полости у рыб.

Время хранения рыбы в аккумуляционном отделении допускалось в течение 11 ч, исходя из технологических регламентов хранения свежего сырья в производственных условиях при его переработке.

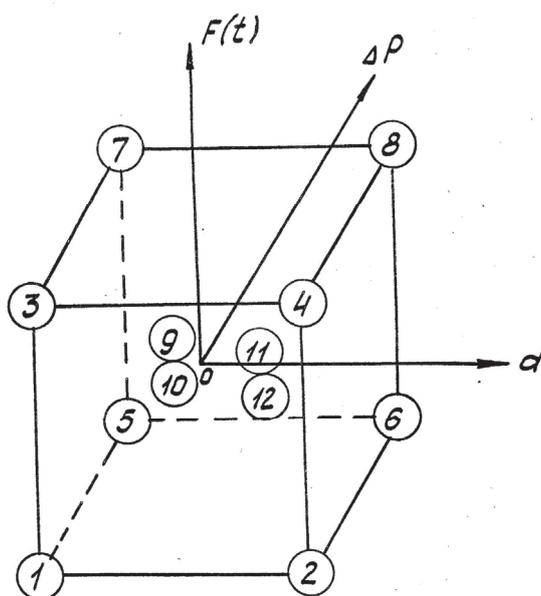


Рис. 2. План проверочного эксперимента из 12 опытов
Fig. 2. Plan of test experiment 12 experiments

Разрежение в насадках принимали в пределах $5,3 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^4$ Па.

Принятые уровни сведены в табл. 1.

Для удобства эти уровни закодированы при помощи следующих уравнений преобразования таким образом, что нижний уровень соответствует -1 , а верхний $+1$:

$$X_1 = \frac{2(\ln \Delta P - \ln 8)}{\ln 8 - \ln 5,3} + 1.$$

$$X_2 = \frac{2(\ln d - \ln 0,16)}{\ln 0,16 - \ln 0,08} + 1. \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{2(\ln F - \ln 5,6)}{\ln 5,6 - \ln 1,1} + 1.$$

Таблица 1

Уровни планирования экспериментов по вакуум-отсосу внутренностей у рыб

Table 1

The levels of planning of experiments on vacuum-suck the innards of fish

Уровень планирования	ΔP , Па · 10 ⁴	d, м	F, Н	Кодовое обозначение		
				X ₁	X ₂	X ₃
Верхний	8,0	0,016	5,6	1	1	1
Средний	5,6	0,012	3,1	0	0	0
Нижний	5,3	0,008	1,1	-1	-1	-1

Проведение эксперимента.

Эксперименты проводили на вакуумной установке с использованием базовой производственной машины ИРПС-2 (рис. 3).

Первая пробная серия из шести опытов была проведена в случайном порядке. После анализа результатов опытов были проведены шесть дополнительных. Результаты 12 опытов приведены в табл. 2 вместе с действительными значениями качества разделки рыбы и кодовыми обозначениями.

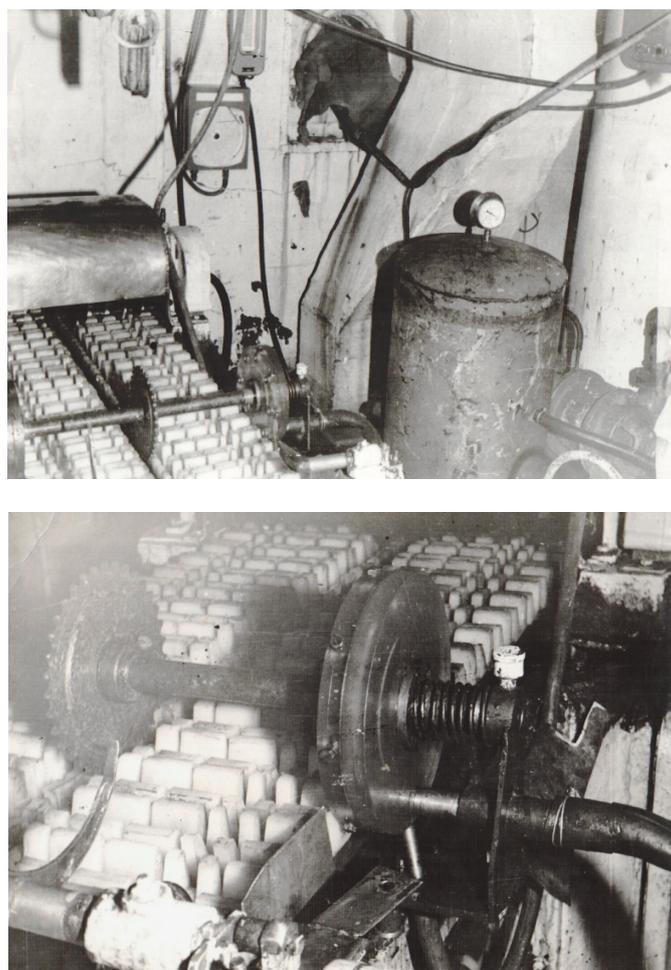


Рис. 3. Машина ИРПС-2 укомплектована вакуумной системой для разделки сайры
 Fig. 3. Machine IRPS-2 equipped with a vacuum system for cutting saury

Оценка параметров.

По окончании первой серии из шести опытов можно оценить четыре коэффициента в постулированной эмпирической формуле:

$\dot{Y} = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + \epsilon$, пользуясь методом наименьших квадратов.

Основная формула имеет вид:

$$B = (X^1 X)^{-1} X^1 Y^1, \quad (7)$$

где $(X^1 X)$ – матрица коэффициентов нормальных уравнений;

$(X^1 X)^{-1}$ – матрица ошибок, или корреляционная матрица.

При ортогональном планировании корреляционная матрица $(X^1 X)^{-1}$ становится диагональной, в этом случае все коэффициенты определяются независимо друг от друга и все ковариации показываются равными нулю; благодаря применению метода наименьших квадратов выборочные коэффициенты регрессии обладают свойством минимальной дисперсии.

Таблица 2

Результаты 12 опытов с заданными параметрами вакуумной разделки рыб

Table 2

The results of 12 experiments with the defined parameters of the vacuum cutting fish

Номер опыта	ΔP , Па · 10 ⁴	d , м	F , Н	Кодовые обозначения			C_1 , %	y
				X ₁	X ₂	X ₃		
1	5,3	0,008	1,1	-1	-1	-1	46	3,828
2	8,0	0,008	1,1	1	-1	-1	84	4,430
3	5,3	0,016	1,1	-1	1	-1	38	3,637
4	8,0	0,016	1,1	1	1	-1	66	4,189
5	5,3	0,008	5,6	-1	-1	1	17	2,833
6	8,0	0,008	5,6	1	-1	1	23	3,135
7	5,3	0,016	5,6	-1	1	1	19	2,944
8	8,0	0,016	5,6	1	1	1	55	4,007
9	5,6	0,012	3,1	0	0	0	67	4,204
10	5,6	0,012	3,1	0	0	0	69	4,234
11	5,6	0,012	3,1	0	0	0	65	4,174
12	5,6	0,012	3,1	0	0	0	68	4,219

С размерным составом рыб, равным 0,22–0,32 м, матрица независимых переменных X для первой серии из шести опытов имеет вид:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Отсюда

$$X^1X = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$(X^1X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Следовательно, уравнение (5) можно записать для первых шести опытов следующим образом:

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{6}(y_2 + y_3 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10}). \\ B_1 &= \frac{1}{4}(y_2 - y_3 - y_5 + y_8). \\ B_2 &= \frac{1}{4}(-y_2 + y_3 - y_5 + y_8). \\ B_3 &= \frac{1}{4}(-y_2 - y_3 + y_5 + y_8), \end{aligned} \quad (11)$$

где индексы при y обозначают номера опытов.

Подставляя в уравнение (5) значения коэффициентов, вычисленные по уравнениям (11), получим уравнение, предсказывающее значения качества разделки для первых шести опытов:

$$\hat{y} = 3,890 + 0,491X_1 + 0,095X_2 - 0,365X_3. \quad (12)$$

В табл. 3 приведены значения качества разделки рыбы, полученные по уравнению (12) и по эксперименту.

Таблица 3

Значения качества разделки рыб по уравнению и по эксперименту

Table 3

Values of the quality of cutting fish by the equation and the experiment

Номер опыта	C_1	y	C_1^1	y'	$y - y'$	$(y - y')^2$	95 % доверительные интервалы	
							C_1^1	y'
2	84	4,430	83,5	4,425	0,005	0,000025	66,1–100	4,191–4,659
3	38	3,637	39	3,663	-0,026	0,000676	39–49,3	3,429–3,897
5	17	2,833	19	2,944	-0,111	0,012321	15,1–24,0	2,710–3,178
8	55	4,007	57	4,043	-0,036	0,001296	45,1–72,1	3,809–4,277
9	67	4,204	69	4,234	-0,030	0,000900	54,7–87,3	4,000–4,468
10	69	4,234	68	4,219	0,005	0,000025	49,2–86,0	3,985–4,453

Нужно заметить, что вследствие ортогональности плана вычисленные значения коэффициентов B_0, B_1, B_2, B_3 не коррелированы между собой.

Доверительные интервалы.

Вследствие ошибки опыта ϵ , оцениваемые параметры, а отсюда оцененное значение качества разделки y^i ненадёжны. Лучшим способом определения точности этих величин является расчёт соответствующих доверительных интервалов. Если принять, что наблюдения y не коррелированы, то ошибки ϵ имеют нормальное распределение и одинаковые дисперсии и можно вычислить доверительные интервалы для данного i -го параметра, воспользовавшись величинами:

$$\text{статистика } i \pm t_f \sqrt{C^{ii} \cdot S^2}, \quad (13)$$

где C^{ii} – элементы i -й строки и i -го столбца матрицы $(X^1 X)^{-1}$;

S^2 – оценка дисперсии.

Эти границы ошибки можно применять для выведения следующей формулировки вероятности или доверительного интервала:

$$P \left(\text{статистика } i - t_f \sqrt{C^{ii} \cdot S^2} \leq \text{параметр} \leq \right. \\ \left. \leq \text{статистика } i + t_f \sqrt{C^{ii} \cdot S^2} \right) = 1 - \alpha, \quad (14)$$

где $1 - \alpha$ – уровень вероятности.

Границы ошибок для зависимой переменной, т. е. качества разделки рыбы, определяются выражением

$$y^i \pm t_f \sqrt{C_1(y^i)}, \quad (15)$$

из которого получается доверительный интервал для зависимой переменной

$$P \left(y^i - t_f \sqrt{C_1(y^i)} \leq \text{зависимая переменная} \leq \right. \\ \left. \leq y^i + t_f \sqrt{C_1(y^i)} \right) = 1 - \alpha.$$

Для первых шести опытов вычислим доверительные интервалы. При вычислении доверительного интервала сначала необходимо определить дисперсию и стандартное отклонение.

Оценка дисперсии S^2 , основанная на сумме квадратов разностей при 2 степенях свободы, равна 0,0152.

Дисперсия оценки качества разделки рыбы на вакуумной установке вычисляется в соответствии с различными значениями технологических параметров.

1. Для опытов 2, 3, 5 или 8:

$$C_1(y^i) = C_1(B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3) = \\ = C_1(B_0) + X_1^2 C_1(B_1) + X_2^2 C_1(B_2) + X_3^2 C_1(B_3) = \\ = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) S^2 = \frac{11}{12} S^2. \quad (16)$$

Следовательно, 95 % доверительный интервал равен:

$$y' \pm t_2 \sqrt{\frac{11}{12} S^2} = 2 \sqrt{\frac{11}{12}} 0,0152 = y' \pm 0,234.$$

2. Для опытов 9 и 10

$$C_1(y') = \frac{1}{6} S^2; \quad y' \pm t_2 \sqrt{\frac{1}{6} S^2} = y' \pm 0,100.$$

Проверка адекватности постулированной модели.

Обычный метод проверки адекватности данной модели заключается в вычислении отношения среднеквадратичной невязки к среднеквадратичной ошибке и в сравнении этого отношения со статистикой F^* .

Среднеквадратичная ошибка оценивается по повторным опытам, проведённым при одинаковых режимах. В первых шести опытах центральная точка повторялась дважды, чтобы получить оценку среднеквадратичной ошибки. Среднеквадратичная ошибка, оценённая по повторным опытам, равна 0,000925.

Среднеквадратичная невязка равна разности суммы квадратов разностей и среднеквадратичной ошибки $0,0152 - 0,000925 = 0,014275$.

Расчётное значение статистики F^* равно:

$$F^* = \frac{S_1^2 / f_1}{S_2^2 / f_2} = \frac{0,014275}{0,000925} = 15,43.$$

Статистика Фишера, заимствованная из таблицы [6] при 2 степенях свободы, равна:

$$F^* = 161,4; \quad F^* \ll F^* .$$

Следовательно, делаем заключение, что постулированная математическая модель адекватна.

Выводы

На основании выполненных теоретических и экспериментальных работ по вакуумной разделке рыб можно констатировать:

1. Экспериментальные данные, полученные в результате проведения работ по вакуумной разделке рыб, согласуются с теоретическими на 84 %.

2. Аналитические формулы, полученные для вакуумной разделки рыбы, включают основные параметры при проведении процесса и могут быть рекомендованы для выявления оптимальных режимов обработки сырья, а также для использования при проектировании нового рыбообделочного оборудования с вакуумной разделкой применительно для мелких и средних по размерам рыб.

3. Предлагаемая методика сопоставления результатов реального процесса при вакуумной разделке рыбы и модели достаточно распространённая в других областях исследований, приемлема для многих инженерных и технологических процессов.

Список литературы

1. Погонец, В.И. Исследования процесса разделки сардины тихоокеанской вакуумным способом / В.И. Погонец // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2016. – Вып. 38. – С. 96–100.
2. Погонец, В.И. Исследование процесса извлечения внутренностей рыб вакуум-способом / В.И. Погонец // Состояние и развитие работ в области автоматизации обработки рыбы: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л., 1991. – С. 13–16.
3. Погонец, В.И. К вопросу оптимизации процесса разделки рыб вакуум-способом / В.И. Погонец // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – Вып. 23. – С. 263–266.
4. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – М.: ИЛ, 1951. – 575 с.
5. Труды Американского общества инженеров и механиков // Мир. – 1964. – № 2. – С. 25–31.
6. Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М.: Физматгиз, 1961. – 479 с.

Сведения об авторе: Погонец Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, e-mail: pogonetsvi@mail.ru.