

УДК 621.565

Анализ данных о плотности инея, образующегося на охлаждаемых поверхностях

Канд. техн. наук **В. Л. КОШЕЛЕВ**¹, канд. техн. наук **А. И. ЕЙДЕЮС**²канд. техн. наук **С. В. КОШЕЛЕВ**²¹ООО «РЕФИМПЭКС»,²Калининградский государственный технический университет,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

E-mail: kaf_xktk@bgarf.ru

При достаточно большом числе исследований, посвященных образованию инея на холодных поверхностях, достоверных данных об изменениях плотности слоя инея ρ_u сравнительно мало. Наиболее изученными являются процессы инеобразования на плоских поверхностях. В статье показаны значительные расхождения результатов расчета по эмпирическим формулам при одинаковых исходных данных. Расчетная плотность ρ_{up} , найденная по времязависящим методикам, сопоставлялась с экспериментально полученными значениями ρ_{us} . Степень совпадения расчетных и экспериментальных данных оценивалась по среднему значению отношения $(\rho_{up}/\rho_{us})_{cp}$ и среднему квадратичному отклонению (СКО) в пяти вариантах исходных данных. Она оказалась невысокой по всем 10 методикам. Чтобы добиться лучшего совпадения ρ_{up} и ρ_{us} , выполнен регрессионный анализ исходных данных по упомянутым пяти вариантам. Коэффициенты выбранных уравнений регрессии и показатели степени совпадения ρ_{up} и ρ_{us} приводятся в таблицах статьи и могут применяться в инженерной практике. По результатам анализа отмечается: недостаточное количество опытных данных о плотности ρ_{us} при обмерзании даже пластин; целесообразность выбора вида уравнения при обобщении каждого массива исходных данных.

Ключевые слова: охлаждаемые поверхности, образование инея, плотность слоя, опытные и расчетные данные.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.05.2022, одобрена после рецензирования 15.08.2022, принята к печати 02.09.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-80-88

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Кошелев В. Л., Ейдеюс А. И., Кошелев С. В. Анализ данных о плотности инея, образующегося на охлаждаемых поверхностях // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 80–88. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-80-88

Data analysis of frost density formed on cooled surfaces

Ph. D. **V. L. KOSHELEV**¹, Ph. D. **A. I. EIDEYUS**², Ph. D. **S. V. KOSHELEV**²¹REFIMPEX LLC,²Kaliningrad State Technical University, Baltic State Academy of Fishing Fleet

E-mail: kaf_xktk@bgarf.ru

With a sufficiently large number of studies devoted to the formation of frost on cold surfaces, there are relatively few reliable data on changes in the density ρ_u of the frost layer. The most studied are the processes of frost formation on flat surfaces. The calculated density ρ_{up} , found by time-dependent methods was compared with the experimentally obtained values ρ_{us} . The degree of agreement between the calculated and experimental data was assessed by the mean value of the ratio $(\rho_{up}/\rho_{us})_{cp}$ and the standard deviation in five variants of the initial data. It turned out to be low in all ten methods. To achieve a better match of ρ_{up} and ρ_{us} , a regression analysis of the initial data was performed for five mentioned options. The coefficients of the selected regression equations and indicators of the degree of coincidence for ρ_{up} and ρ_{us} are shown in the tables and can be used in engineering practice. According to the results of the analysis it is noted insufficient amount of experimental data on the density ρ_{us} during freezing even of plates; the expediency of choosing the type of equation when summarizing each array of initial data.

Keywords: cooled surfaces, frost formation, layer density, experimental and calculated data, analysis.

Article info:

Received 10/05/2022, approved after reviewing 15/08/2022, accepted 02/09/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-80-88

Article in Russian

For citation:

Koshelev V. L., Eideyus A. I., Koshelev S. V. Data analysis of frost density formed on cooled surfaces. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 3. p. 80–88. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-80-88

Введение

Чтобы поддержать эффективную работу холодильных машин и тепловых насосов периодически проводят удаление слоя инея с поверхности воздухоохладителей (ВО) разными способами. Они предполагают вывод из действия всего ВО или отдельных его секций, что приводит к временной потере производительности и дополнительным затратам энергии. Частота и длительность оттаивания зависит от параметров обребрения ВО и условий его работы. Направленное на экономию энергоресурсов планирование оттаивания требует точной информации об изменении показателей слоя инея по времени.

За последние десятилетия специалистами многих стран проводились исследования разных аспектов инеобразования. Значительная часть основополагающих работ относится к формированию слоя инея на поверхностях простой геометрии (пластина, цилиндр). В них изучался процесс и механизм образования и роста инея, изменения его структуры (морфологии) со временем. Много усилий затрачено на подготовку эмпирических и полуэмпирических зависимостей для расчета (предсказания) толщины слоя $\delta_{ин}$, плотности $\rho_{ин}$ и удельной теплопроводности $\lambda_{ин}$ инея. Многократно проводились исследования влияния условий формирования инея на скорость его накопления и изменение теплофизических свойств. Обзор и критический анализ серьезных исследований представлен в статьях [1]–[4] и др.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию инеобразования на холодных поверхностях разной геометрии, общепризнанные методики определения теплофизических свойств инея до сих пор не созданы. Дело в том, что образование, рост и уплотнение слоя инея представляет собой сложный процесс нестационарного тепло-массообмена, во время которого изменяются плотность, удельная теплопроводность и другие показатели свойств инея. Особенность заключается в том, что количество отводимой от воздуха влаги идет на увеличение, как толщины слоя инея, так и его плотности $\rho_{ин}$. В свою очередь, многие свойства инея, включая толщину слоя и коэффициент теплопроводности, зависят от плотности $\rho_{ин}$ [4], [5]. Цель данной работы сводилась к поиску и освоению методик расчета плотности $\rho_{ин}$, сравнению результатов расчета с доступными опытными данными и получению несложных зависимостей для расчета значений $\rho_{ин}$ при разных условиях образования инея на плоских поверхностях.

Сокращения и условные обозначения

ВО — воздухоохладитель с плоскими пластинами;
 СКО — среднее квадратичное отклонение;
 Ср. знач — среднее арифметическое значение;
 Re — число Рейнольдса;
 Ja — модифицированное число Джейкоба (Jacob);
 Fo — число Фурье;
 D_a — коэффициент диффузии водяного пара в воздух, m^2/c ;
 d_a — влагосодержание охлаждаемого воздуха, г/кг_{с.в.}; $d_{п-}$ — то же при температуре пластины;
 c_{pa} — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);
 L — длина пластины по ходу воздуха, м;
 h_{sv} — теплота сублимации водяного пара, Дж/кг;

t — температура, °С; t_a — охлаждаемого воздуха;
 t_p — точки росы; $t_{п-}$ — холодной поверхности; $t_{пн}$ — поверхности слоя инея; t_0 — хладагента или хладоносителя; $t_{пл}$ — тройной точки (плавления) инея, принимаемая равной 0,01 °С;

v_a — скорость воздуха, м/с;
 ρ — плотность, кг/м³: $\rho_{ин}$ — инея: ($\rho_{ин,р}$ — расчетная, $\rho_{ин,э}$ — экспериментальная); ρ_a — воздуха; $\rho_л$ — льда;
 ϕ — относительная влажность воздуха, (-);
 τ — время от начала обмерзания, с;
 μ_a — динамическая вязкость воздуха, Па·с;
 $\lambda_{ин}$ — коэффициент теплопроводности слоя инея, Вт/(м·К);
 $\delta_{ин}$ — толщина слоя инея, мм;
 $\epsilon_{ин}$ — пористость слоя инея, (-);
 θ — угол смачивания поверхности, близкий к 90° для обычных поверхностей.

Методики расчета плотности инея

В современных источниках, посвященных образованию инея, как на пластинах, так и на теплопередающей поверхности ВО, приводятся методики для определения средней плотности $\rho_{ин}$, предложенные в свое время разными авторами. Эти методики можно разделить на четыре группы.

1. Эмпирические формулы для определения плотности $\rho_{ин}$ по параметрам охлаждаемого воздуха, средним температурам холодной поверхности $t_{п-}$ и/или наружного слоя инея $t_{пн}$; последняя обычно неизвестна.

2. Вреязависящие (time-dependent) методики определения плотности $\rho_{ин}$ при заданных условиях образования инея на поверхности простой геометрии, в большинстве из которых не используется температура $t_{пн}$.

3. Определение плотности $\rho_{ин}$ в зависимости от пористости слоя инея $\epsilon_{ин}$, найденной тем или иным способом. Пока что не созданы методики расчета пористости $\epsilon_{ин}$ без данных о плотности $\rho_{ин}$.

4. Определение плотности $\rho_{ин}$ наряду с толщиной $\delta_{ин}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ин}$ слоя инея путем моделирования нестационарного процесса тепло-массообмена на холодных поверхностях, как простой геометрии, так и реальных ВО. Вне зависимости от принимаемых допущений эти модели достаточно сложны, не универсальны и заслуживают отдельного рассмотрения.

Опытные данные о плотности инея $\rho_{ин}$ на плоской поверхности или в канале между ними, удалось найти в источниках [6]–[19]. Для дальнейшей обработки выбрано 302 значения плотности $\rho_{ин}$, для которых указаны почти все условия инеобразования.

Эмпирические формулы

С целью экономии места в данной работе ниже после каждой формулы приводятся лишь фамилии автора (ов), год публикации, номер источника, из которого взята формула для определения $\rho_{ин}$ и ее порядковый номер:

$$\rho_{ин} = 340 |t_{пн}|^{-0,445} + 85 v_a, \text{ Hosoda, Uzuhashi (1967), [2]; (1)}$$

$$\rho_{ин} = 650 \exp(0,277 \cdot t_{пн}), \text{ Hayashi и др. (1977), [16]; (2)}$$

$$\rho_{ин} = 1562,5 (v_a \rho_a)^{0,15} \delta_{ин}^{0,35} (t_a / t_{пн}), \text{ Ломакин (1989), [4]; (3)}$$

$$\rho_{и} = 0,9567 \text{ Re}^{-0,0237} d_a^{-1,262} \left(\exp\left(\frac{t_{пн} - t_m}{t_a - t_{пн}}\right) \right)^{3,9347}, \text{ Yang}$$

и др. (2004), [20]; (4)

$$\rho_{и} = 207,3 \exp(0,266 t_{пн} - 0,0615 t_{пн}), \text{ Hermes (2013), [21]; (5)}$$

$$\rho_{и} = 492,95 \exp(-0,053(t_p - t_0)), \text{ Knabben и др. (2010), [22]; (6)}$$

$$\rho_{и} = 494 \exp(0,11 t_{пн} - 0,06 t_p), \text{ Da Silva и др. (2018), [23]; (7)}$$

$$\frac{\rho_{и}}{\rho_{л}} = 0,5 \left(\frac{t_{пн} - t_{пн}}{t_m - t_{пн}} \right) \exp\left(-\left(0,376 + 1,5 \left(1 - \frac{t_{пн} - t_n}{t_m - t_n} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{Re}{50000} \right)^{0,5} \right) \right),$$

Kandula (2011), [21]; (8)

$$\rho_{и} = 650 \exp(0,277 t_{пн}) c_1 c_2, \text{ Wang и др. (2012), [11], (9)}$$

где $c_1 = 0,70132 - 0,011346 t_{пн} - 0,00203 t_{пн}^2$;

$$c_2 = 0,7185 + 0,05(11 - t_a) + 0,025(11 - t_a)^2.$$

Диапазон применения формул, который удалось получить из источников, указан в табл. 1.

В формулы (2), (5), (6), (7), (9) не входит скорость воздуха v_a , но лишь для формулы (7) диапазон применения приводится без упоминания скорости v_a . Формулы (5) и (7) получены при фиксированных скоростях 0,7 и 5 м/с, соответственно. Если по формуле (1) плотность $\rho_{и}$ существенно повышается с ростом скорости v_a , то по формулам (3), (4), (8) при этом получается небольшое ее повышение. Чтобы воспользоваться формулами (2)–(5), (7)–(9) необходимо знать температуру поверхности инея $t_{пн}$, которая зависит от многих факторов. Как расчетное, так и экспериментальное определение $t_{пн}$ оказывается затруднительным.

В последние два десятилетия формулы (1)–(9) применяются в отдельных моделях инеобразования, которые предполагают пошаговый тепло-гидравлический расчет ВО, включая определение средней температуры $t_{пн}$. Чаше других встречается формула (2). При каждом сочетании исходных данных эмпирические формулы дают по одному значению плотности $\rho_{и}$. В процессе образования инея растут толщина слоя инея $\delta_{и}$ и термическое его сопротивление. Это сопровождается повышением температуры $t_{пн}$, что по большинству формул вызывает рост плотности $\rho_{и}$.

Времязависящие методики

Приведем сначала безразмерные величины, которые часто используются при описании методик.

Число Рейнольдса $Re = v_a \rho_a \cdot L / \mu_a$.

Модифицированное число Джейкоба (Jacob)

$$Ja = c_{pa} (t_p - t_{пн}) / (d_a - d_{пн}) h_{sv}.$$

Число Фурье: $Fo = D_a \tau / L^2$.

Отношения разницы температур:

$$T_1 = (t_a - t_{пн}) / (t_a - t_{пн}); T_2 = (t_{пн} - t_{пн}) / (t_a - t_{пн}); \quad (10)$$

Сохраняется прежний порядок представления методик:

$$\rho_{и} = 5,47 \text{ Re}^{0,16} Ja^{0,29} (d_{пн} / d_a) \tau^{0,34}, \text{ Leoni и др. (2016), [2]; (11)}$$

$$\rho_{и} / \rho_{л} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ Re}^{0,351} Fo^{0,311} d_a^{-0,368} (\exp T_1)^{2,4}, \text{ Yang (2004), [24]; (12)}$$

$$\rho_{и} / \rho_{л} = 0,000882 \exp(1,663 / Ja) Fo^{0,5}, \text{ Hermes и др. (2013), [21]; (13)}$$

$$\rho_{и} = 2,2 Ja^{-1,5} \tau^{0,5}, \text{ Hermes и др. (2014), [25]; (14)}$$

$$\rho_{и} / \rho_{л} = 5,559 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\delta}{L} \right)^{-0,137} \text{ Re}^{0,715} Fo^{0,252} v_a^{-0,413} \left(\frac{T_{пн} - T_{пн}}{T_a - T_{пн}} \right)^{-0,997},$$

Мао и др. (1992), [1]; (15)

$$\rho_{и} / \rho_{л} = 1,714 \cdot 10^{-4} (0,5)^{-0,056} d_a^{-0,11} T_2^{0,845} \text{ Re}^{0,463} Fo^{0,217},$$

Мао (1999), [1]; (16)

$$\rho_{и} = 2,17 Ja^{-1,5} \tau^{0,5} (4,5 / \ln \theta)^{0,95} (0,8 / \varphi)^{0,61}, \text{ Sommers и др. (2017), [26]; (17)}$$

$$\rho_{и} = (109,53 - 45,54 \cdot \lg \theta) \tau^{0,0479 - 0,04357}, \text{ Shin и др. (2003), [14]; (18)}$$

$$\rho_{и} = \rho_{л}^{0,000448} \exp\left(\left(\frac{d_a - d_{пн}}{t_p - t_{пн}} \right) \cdot \frac{1,663 h_{sv}}{c_{pa}} \right), \text{ Loyola и др. (2013), [27]; (19)}$$

Методики расположены по степени универсальности, которая во многом характеризуется шириной диапазона применения, приведенного в табл. 2. Нетрудно заметить, что методики (13) и (14) подходят лишь при скорости $v_a = 0,7$ м/с, а методика (18) — при температуре $t_a = 12$ °С. Большинство методик предполагает охлаждение теплого воздуха. Достаточно широкий диапазон скорости v_a охватывает лишь методика (11).

Таблица 1

Диапазон применения формул

Table 1

The range of formulae application

№	$t_a, ^\circ\text{C}$	φ	t_n или $t_{пн}, ^\circ\text{C}$	$v_a, \text{ м/с}$	$d_a, \text{ г/кг}$	$\tau, \text{ с}$	$t_p - t_{пн}, ^\circ\text{C}$
(1)	0...10	—	-20...-5	1...5	1,88...6,04	<240	—
(2)	—	—	-18,6...-5	2...6	7,5	<450	—
(3)	-15...5	0,65...0,96	—	—	—	<64800	—
(4)	5...15	—	-35...-15	1...2,5	3,22...8,47	—	—
(5)	16...22	0,5...0,8	-15...-5	0,7	—	—	—
(6)	-18...-15	0,20...0,80	—	—	—	<240	—
(7)	2,5...7	0,74...0,83	-10...-3	—	—	—	5...14,5
(8)	18...22	0,5...0,81	-18...-7	1,7...2,7	—	—	—
(9)	-8...19	0,42...0,8	-16...-8	5	—	—	—

Таблица 2

Диапазон применения методик

Table 2

The range of techniques' application

№	$t_a, ^\circ\text{C}$	φ	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$v_a, \text{м/с}$	$d_a, \text{г/кг}$	Re	L, м
(11)	-8...25	0,12...-4	-22...-4	0,7...6	-	-	0,04...1
(12)	5...15	-	-35...-15	1...2,5	3,2...8,5	-	0,3
(13)	16...22	0,5...0,8	-15...-5	0,7	-	-	0,1
(14)	16...22	0,5...0,8	15...-5	0,7	-	-	0,1
(15)	15...23	-	-5...-15	1,2...2,7	-	-	-
(16)	-10,1...-25,8	-	-41...-20,5	-	-	3300...13100	-
(17)	18...24	0,4...0,8	-13...-5	-	-	-	-
(18)	12	-	-22	1,57	-	-	-
(19)	18...27,3	0,39...0,6	-20,5...-4	0,5...1	-	-	-

Каждая из эмпирических формул и времязависящих методик распространяется на сравнительно узкий диапазон параметров. Наряду с ограниченным объемом экспериментальных данных это затрудняет оценку достоверности методик расчета.

Расчет по эмпирическим формулам

Формулы (1)–(9) подготовлены по опытным данным обмерзания пластин, охватывающим разные диапазоны исходных данных. Для сопоставления результатов расчета по разным формулам целесообразно находить температуру $t_{\text{ни}}$ по времязависящей методике, изложенной в статье [24]. Время τ от начала процесса задается при расчете числа Fo. Так как в формулах (1)–(9) время не учитывается, принято для примера $\tau=1$ ч. Расчеты выполнены при нескольких сочетаниях исходных данных, которые входят в диапазон применения большинства рассматриваемых формул. Одно из них характеризуется параметрами: $t_a=10\text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi=0,7$; $v_a=2\text{ м/с}$; $t_{\text{н}}=-20\text{ }^\circ\text{C}$; $d_a=5,322\text{ г/кг}$; $t_p=4,804\text{ }^\circ\text{C}$; $\delta_{\text{и}}=2,26\text{ мм}$; $t_{\text{ни}}=-13,99\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты расчета приведены в табл. 3 без указания формулы (8), по которой в ряде случаев получается отрицательная плотность.

Данные табл. 3 указывает на большой разброс значений плотности $\rho_{\text{н}}$, полученных по разным формулам при заданных условиях инеобразования. Отчасти это объясняется неодинаковым диапазоном применения формул (1)–(9). Характерно, что на широкий диапазон параметров не распространяется ни одна из формул. Поэтому даже для приближенного расчета плотности затруднительно выбрать подходящую формулу. Дополнительные трудности обусловлены тем, что в описании формул нет четкой информации о длине пластин.

Расчет плотности по времязависящим методикам

Процессы образования инея на плоских поверхностях считаются наиболее изученными к настоящему времени. Ввиду высокой степени оребрения ВО пластины воспринимают основной поток тепло и массообмена. Тем самым объясняется интерес специалистов к образованию инея на пластинах. Основными показателями условий инеобразования на них являются: τ ; t_a ; φ ; $t_{\text{н}}$; v_a ; $t_{\text{пл}}$. Приведенные ранее методики (11)–(19) являются эмпирическими или полуэмпирическими.

Чтобы снизить трудоемкость расчетов, в MS Excel была составлена программа расчета изменений плотности $\rho_{\text{нр}}$ сразу по всем 10 методикам в зависимости от времени τ , продолжительность и шаг которого можно изменять. Результаты расчетов $\rho_{\text{нр}}$ на моменты времени, соответствующие каждой экспериментальной точке, вместе с исходными данными сохраняются в электронной таблице для последующего их анализа. Один столбец этой таблицы заполняется значениями экспериментально полученной плотности $\rho_{\text{нэ}}$; в соответствии с числом точек таблица имеет 302 строки. Используемые в методиках (11)–(19) показатели термодинамических и теплофизических свойств влажного воздуха, а также безразмерные величины Re, Ja, Fo автоматически определяются после каждого ввода исходных данных для соответствующей строки. Выбранное построение электронной таблицы позволяет находить отношение расчетных значений плотности $\rho_{\text{нр}}$, найденных по соответствующей методике, к экспериментально полученному значению $\rho_{\text{нэ}}$ для каждой точки. Практический интерес представляет среднее арифметическое этих отношений «Ср. знач» и стандартное (среднее квадратичное) отклонение (СКО), полученное по каждой методике. Результа-

Таблица 3

Расчетные значения плотности по формулам, кг/м³

Table 3

Calculated values of density according to formulae, kg/m³

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(12)
259,6	13,49	237,4	87,8	4,18	119,1	41,0	23,1	89,3

ты расчета плотности ρ_{np} для массива из 302 точек использованы для отбора методик и качественной оценки опытных данных.

Из-за большого объема расчетных данных в электронной таблице, к обсуждаемым итогам отнесены лишь средние значения отношений $\rho_{np}/\rho_{из}$ и их СКО. По мере выявления причин несовпадения значений ρ_{np} и $\rho_{из}$ число строк в таблице изменялось. Во-первых, были исключены из рассмотрения источники с опытными данными, в которых характер изменения плотности $\rho_{из}$ во времени отличается от общепризнанного. Во-вторых, из общего массива проводилась выборка сочетаний с исходными данными, попадающими в диапазон применения той или иной методики расчета. Для компактности в табл. 4 приводятся сравнительные величины для пяти вариантов с неодинаковым числом точек. Диапазон изменения влияющих величин по указанным вариантам исходных данных приводится в табл. 5.

Понятно, что методика расчета в любом варианте может быть признана приемлемой, когда «Ср. знач» при-

ближается к единице, а «СКО» к нулю. Нижняя часть таблицы обсуждается далее по тексту статьи.

Как следует из табл. 4, по варианту 1, использующему общий массив исходных данных, ни одна методика не обеспечивает приемлемой точности расчета. Вариант 2 отличается тем, что из общего массива исключены опытные данные, с нетрадиционным характером изменения плотности $\rho_{из}$. Ранее отмечалось, что наиболее широкий диапазон применения имеет методика (11). Вариант 3 с числом точек 209 в отличие от предыдущего не содержит входных величин, выходящих за пределы применения методики (11). Вариант 4 с числом точек 151 содержит исходные данные, взятые из источников, использованных авторами статьи [2] при подготовке методики (11). Вариант 5 с числом точек 109 сформирован из варианта 2 путем исключения из него исходных данных, вошедших в вариант 4. Для этого массива по методикам (11)–(19) степень совпадения значений ρ_{np} и $\rho_{из}$ неудовлетворительная, так как $СКО > 1$, в то время как по уравнениям (20)–(25) оно составляет лишь 0,19–0,28.

Таблица 4

Показатели степени совпадения ρ_{np} и $\rho_{из}$ в зависимости от варианта исходных данных, методики расчета и уравнения регрессии

Table 4

Indicators of the degree of coincidence for ρ_{np} and $\rho_{из}$ depending on the variant of initial data, calculation technique and regression equation

№	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	Число точек: 302		Число точек 260		Число точек 209		Число точек 151		Число точек 109	
	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО
(11)	1,3070	0,6861	1,4199	0,6263	1,4800	0,6151	1,4040	0,5629	1,5288	1,1514
(12)	1,1426	0,6026	1,2325	0,5803	1,2497	0,4973	1,2032	0,4794	1,3706	1,2357
(13)	0,8683	1,0571	0,9303	1,1175	0,9604	1,1617	0,6494	0,7569	1,4255	1,7773
(14)	0,6574	0,3074	0,6788	0,3029	0,6760	0,2916	0,7731	0,3439	0,6706	1,2926
(15)	2,0620	11,1465	2,3322	11,9938	1,6520	1,1423	3,1740	15,6811	1,2918	1,6785
(16)	0,0793	0,0599	0,0870	0,0585	0,0940	0,0575	0,0793	0,0568	0,2423	1,5174
(17)	0,7829	0,3115	0,8179	0,3044	0,8235	0,2875	0,9312	0,3263	0,8095	1,5678
(18)	0,6513	0,2896	0,6931	0,2733	0,7070	0,2806	0,6809	0,2943	0,8763	1,7604
(19)	0,6985	0,3015	0,7203	0,2949	0,7150	0,2809	0,7991	0,3385	0,7874	1,8563
Уравнения	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО	Ср. знач	СКО
(20)	1,1212	0,5431	1,0719	0,4064	1,0273	0,2450	1,0145	0,1762	1,0374	0,2855
(21)	1,0728	0,3902	1,0482	0,3175	1,0411	0,2900	1,0252	0,2161	1,0262	0,2258
(22)	1,1028	0,4997	1,0578	0,3558	1,0242	0,2260	1,0138	0,1721	1,0312	0,2570
(23)	1,0644	0,3668	1,0411	0,2932	1,0347	0,2716	1,0244	0,2143	1,0191	0,1908
(24)	1,0635	0,3631	1,0403	0,2859	1,0218	0,2108	1,0137	0,1705	1,0197	0,1909
(25)	1,0643	0,3645	1,0412	0,2884	1,0222	0,2129	1,0131	0,1687	1,0197	0,1910

Таблица 5

Диапазон изменения влияющих величин по вариантам

Table 5

The range of influencing quantities' variation for the variants

Вариант	Время, с	$t_a, ^\circ\text{C}$	φ	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$v_a, \text{м/с}$	$L, \text{м}$	Число точек
1	90...28800	0...25	0,38...0,8	(-25...0)	0,07...19,12	0,019...1	302
2	552...28800	0...25	0,38...0,8	(-25...0)	0,07...19,13	0,019...1	260
3	552...28800	0...25	0,38...0,8	(-22...-4)	0,7...6	0,019...1	209
4	552...25331	0...25	0,38...0,8	(-22...0)	0,7...6	0,04...1	151
5	895...28800	5...25	0,38...0,742	(-25...-5,1)	0,07...6	0,019...1	109

Предпринимались попытки исключить из рассмотрения в этом варианте сочетания исходных данных, выходящих за пределы применимости других методик, кроме (11). Они оказались безуспешными. Из-за сравнительно узких пределов число точек для расчета по другим методикам оказывалось небольшим, а показатели степени совпадения не улучшались. Причины несовпадения могут быть обусловлены как недостатками методик расчета, так и недостоверностью опытных данных.

Обобщение экспериментальных значений плотности инея

К обобщению экспериментальных данных применена классическая линейная модель множественной регрессии (КЛММР). Применительно к указанным выше пяти вариантам исходных данных опробован целый ряд математических уравнений. Наиболее подходящими оказались уравнения степенного вида:

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} \text{Re}^{a_1} \text{Ja}^{a_2} (d_a / d_{\text{п}})^{a_3} \text{Fo}^{a_4}; \tag{20}$$

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} \text{Re}^{a_1} \text{Ja}^{a_2} (d_a / d_{\text{п}})^{a_3} \tau^{a_4}; \tag{21}$$

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} T^{a_1} (d_a / d_{\text{п}})^{a_2} \text{Re}^{a_3} \text{Ja}^{a_4} \text{Fo}^{a_5}; \tag{22}$$

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} T^{a_1} (d_a / d_{\text{п}})^{a_2} \text{Re}^{a_3} \text{Ja}^{a_4} \tau^{a_5}; \tag{23}$$

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} (t_a + 20)^{a_1} \varphi^{a_2} \nu_a^{a_3} L^{a_4} (t_{\text{п}} + 90)^{a_5} \tau^{a_6}; \tag{24}$$

$$\rho_{\text{ип}} = 10^{a_0} (t_a + 20)^{a_1} (d_a / 1000)^{a_2} \nu_a^{a_3} L^{a_4} (t_{\text{п}} + 90)^{a_5} \tau^{a_6}; \tag{25}$$

Безразмерное отношение температур T опробовано в трех вариантах. В последних расчетах $T = (t_a - t_{\text{п}}) / (t_{\text{пл}} - t_{\text{п}})$. Для приведения степенных зависимостей к линейному виду достаточно их прологарифмировать. После этого степенное уравнение получается в виде суммы.

С помощью заложенной в MS Excel функции ЛИНЕЙН были получены коэффициенты a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 , а также результаты дисперсионного оценивания неизвестных параметров КЛММР. Среди них наибольший интерес вызывают значения коэффициента детерминации $r^2 (R^2)$ и стандартной ошибки se_y для оценки $\rho_{\text{ип}}$. Чем выше r^2 и меньше se_y , тем лучше совпадают $\rho_{\text{ип}}$ и $\rho_{\text{из}}$. Значения r^2 и se_y , полученные для пяти вариантов исходных данных по уравнениям (20)–(25), приводятся

в табл. 6. Коэффициенты уравнений регрессии a_i для тех же условий показаны в табл. 7 с учетом их расположения справа налево. Средние значения отношений $\rho_{\text{ип}}/\rho_{\text{из}}$ и СКО при аналогичных условиях приведены в нижней части табл. 4.

Практика показывает, что при $r^2 < 0,7$ трудно ожидать высокой степени совпадения расчетных и опытных данных. Это означает, что для вариантов 1 и 2 ни одно из шести уравнений нельзя признать подходящим. Поскольку в других вариантах с использованием тех же уравнений получаются более высокие значения r^2 , приходится констатировать, что в этих двух массивах содержатся данные, которые не подпадают под общую закономерность. С учетом сказанного из табл. 7 исключены строки, относящиеся к вариантам 1 и 2. В связи с тем, что каждая пара уравнений (20)–(25) различается лишь одной независимой переменной, а показатели точности при этом изменяются несущественно, для краткости приводятся только коэффициенты уравнений (20), (22), (24).

Найденные коэффициенты уравнений регрессии a_i по всем вариантам и уравнениям можно использовать на практике для расчета плотности $\rho_{\text{ип}}$ при конкретных сочетаниях исходных данных, попадающих в диапазон изменения влияющих величин того или иного варианта. Предварительно по табл. 6 следует выбрать уравнение регрессии, которое в подходящем диапазоне дает высокий коэффициент r^2 и малую ошибку se_y .

Наглядное представление о степени совпадения расчетных и опытных данных обеспечивают точечные диаграммы зависимости $\rho_{\text{ип}}$ от $\rho_{\text{из}}$. На них отображаются не относительные, а действительные значения $\rho_{\text{ип}}$ и $\rho_{\text{из}}$. Приведенные на рис. 1 диаграммы указывают на меньший разброс точек при обобщении одних и тех же значений $\rho_{\text{из}}$ по уравнению (20), чем по методике (11).

Выводы

Выполненный анализ указывает на ограниченный объем как экспериментальных, так и расчетных данных о плотности инея на холодных поверхностях. Большинство из них получено при охлаждении воздуха с положительной температурой и высоким влагосодержанием. После небольшого отсева с временных графиков, опубликованных в разных источниках, собраны 302 точки экспериментально полученных значений плотности $\rho_{\text{из}}$

Таблица 6

Коэффициенты r^2 и стандартные ошибки se_y для оценки $\rho_{\text{ип}}$

Table 6

Coefficients r^2 and standard errors se_y for estimating $\rho_{\text{ип}}$

Уравнения	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	r^2	se_y	r^2	se_y	r^2	se_y	r^2	se_y	r^2	se_y
(20)	0,2436	0,2183	0,4129	0,1655	0,7844	0,1016	0,9062	0,0742	0,5409	0,1211
(21)	0,5472	0,1689	0,6015	0,1363	0,6650	0,1266	0,8208	0,1026	0,6652	0,1034
(22)	0,3611	0,2009	0,5172	0,1499	0,8069	0,0963	0,9100	0,0727	0,6134	0,1116
(23)	0,5993	0,1591	0,6554	0,1266	0,7191	0,1162	0,8272	0,1008	0,7537	0,0891
(24)	0,6043	0,1584	0,6578	0,1264	0,8225	0,0926	0,9121	0,0721	0,7414	0,0917
(25)	0,5981	0,1596	0,6496	0,1279	0,8198	0,0933	0,9145	0,0711	0,7410	0,0918

Коэффициенты уравнений регрессий

Table 7

Coefficients for regression equations

Формула	Данные	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
(20)	вар. 3	—	—	0,3097933	0,1781531	-0,9394673	0,5477897	-0,1085737
	вар. 4	—	—	0,3638704	0,2094824	-1,0254015	0,6406253	-0,4979037
	вар. 5	—	—	0,0106055	0,1849138	-1,2276746	-0,0545412	2,7481612
(22)	вар. 3	—	0,2918228	-0,7319028	0,4768325	-0,0168699	0,1937376	0,0891107
	вар. 4	—	0,3605268	-0,9535640	0,6290572	-0,1843375	0,0286671	-0,4714815
	вар. 5	—	0,0230491	-0,9003265	-0,0529815	0,0167174	0,2686174	2,5832054
(24)	вар. 3	0,3386490	3,1194778	-0,0635225	0,3773972	-0,1988735	0,5393693	-5,9978082
	вар. 4	0,3834267	3,5235353	-0,0528946	0,5528887	0,1212674	0,4093807	-6,6659742
	вар. 5	0,2880758	4,3202012	-0,0144538	-0,1442132	-0,0536012	0,8516803	-8,3184322

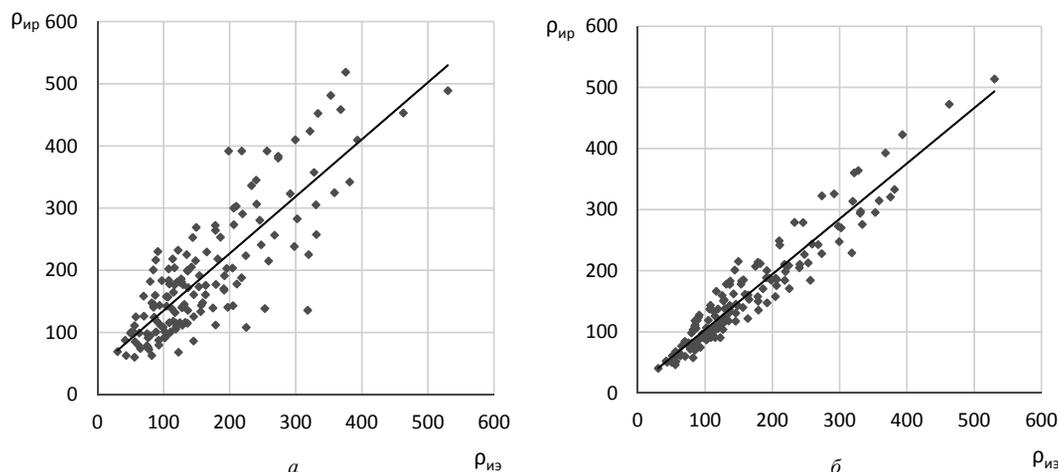


Рис. 1. Взаимосвязь между ρ_{ip} и ρ_{iv} для варианта 4: а — по методике (11); б — по уравнению (20)

Fig. 1. Interrelation between ρ_{ip} and ρ_{iv} for variant 4: а — according to technique (11); б — according to equation (20)

с достаточно полным указанием условий образования инея.

Практическому применению эмпирических формул препятствует необходимость использования температуры поверхности инея $t_{ин}$. Как измерение, так и расчет ее вызывает значительные трудности. Расчеты показывают значительное расхождение значений ρ_{ip} , полученных по разным формулам при одинаковых сочетаниях исходных данных.

Времязависящие методики расчета плотности инея учитывают больше влияющих факторов. Экспериментальные данные обычно представляются в виде зависимости плотности ρ_{iv} от времени τ или числа Fo с указанием параметров охлаждаемого воздуха, температуры и размеров пластины. Пригодными для обработки являются лишь данные, полученные при постоянных значениях скорости, температуры и влажности воздуха, а также температуры пластины во время каждого опыта. Использование в настоящем исследовании опытных данных, собранных из 13 источников и полученных на разных стендах, может быть причиной их несогласованности между собой. Каждая из методик (11)–(19) подготовлена на основе сравнительно небольшого количества опытных данных. Наибольшее количество точек,

равное 149, лежит в основе методики (11), которая охватывает широкий диапазон исходных данных. Приведенные в табл. 4 средние значения ρ_{ip}/ρ_{iv} и СКО, полученные по методикам (11)–(19) для пяти вариантов исходных данных, показывают невысокую степень совпадения расчетных и экспериментальных значений ρ_{ip}/ρ_{iv} . Результаты можно считать приемлемыми, когда одновременно $(\rho_{ip}/\rho_{iv})_{cp}$ стремится к единице, а СКО не превышает 0,3. Приведенные в нижней части табл. 4 значения $(\rho_{ip}/\rho_{iv})_{cp}$ и СКО, полученные по шести уравнениям регрессии для тех же пяти вариантов исходных данных, указывают на более высокую степень совпадения. Во всех случаях $(\rho_{ip}/\rho_{iv})_{cp} < 1,22$, а СКО $< 0,543$.

До появления единого подхода к расчету плотности ρ_{ip} , которое не ожидается в ближайшее время, рекомендуется проводить альтернативные ее расчеты. Предпочтительно использование двух-трех методик из числа (11)–(19) и хотя бы двух уравнений регрессии (20)–(25). Предлагается следующий порядок действий: а) четко сформулировать исходные данные, характеризующие условия и длительность формирования инея; б) с учетом приведенных в табл. 2 и 5 диапазонов выбрать наиболее подходящие методики и уравнения регрессии, обращая внимание на показатели точности, приведенные в табл. 4

и б; в) по исходным данным определить значения переменных, которые входят в формулы выбранных методик и уравнений; г) составить простую программу расчета изменений плотности $\rho_{\text{ип}}$ и построить временные графи-

ки; д) при отсутствии опытных или иных достоверных данных наиболее вероятными следует считать результаты, по которым характер изменения и численные значения плотности $\rho_{\text{ип}}$ различаются несущественно.

Литература/References

- Iragorry J., Tao Y-X. & Jia S. Review Article: A Critical Review of Properties and Models for Frost Formation Analysis. *HVAC&R Research*. 2004. vol. 10, no 4, P. 393–420.
- Léoni A., Mondot M., Durier F., Revellin R., Haberschill P. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces. *Int. J. Refrigeration*. 2016. vol. 68 P. 198–217.
- Brèque F., Nemer M. Frosting modeling on a cold flat plate: Comparison of the different assumptions and impacts on frost growth predictions. *Int. J. Refrigeration*. 2016. Vol. 69. P. 340–360.
- Козаченко И. С., Лагутин А. Е. Оценка влияния исходных уравнений плотности и теплопроводности инея на результаты прогнозирования скорости формирования намороженного слоя // Холодильная техника и технология. 2017. № 5. Стр. 59–66. [Kozachenko I. S., Lagutin A. E. Evaluation of the influence of the initial equations of density and thermal conductivity of frost on the results of predicting the rate of formation of a frozen layer. *Kholodilnaya Tekhnika I Tekhnologiya*. 2017. No 5. P. 59–66. (in Russian)]
- Королев И. А. Исследование камерного воздухоохладителя с учетом динамики образования инея на теплообменной поверхности аппарата. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2020. 233 с. [Korolev I. A. Study of a chamber air cooler, taking into account the dynamics of frost formation on the heat exchange surface of the apparatus. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2020. 233 p. (in Russian)]
- Afrasiabian E., Iliev O., Lazzari S., Isetti C. Numerical Simulation of Frost Formation on a Plate Fin Evaporator. Proceedings of the 3rd World Congress on Momentum. *Heat and Mass Transfer*. (MHMT'18) Budapest, Hungary — April 12–14, 2018. Paper No. ICMFHT 125: P. 1–9.
- Gong J., Hou J., Sun J., Li G., Gao T. A. Numerical Investigation of Frost Growth on Cold Surfaces Based on the Lattice Boltzmann Method. *Energies*. 2018. No 11. 13 p.
- Sommers A., Truster N., Napora A., Riechman A., Caraballo E. Densification of frost on hydrophilic and hydrophobic substrates — Examining the effect of surface wettability. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. No 75. P. 25–34.
- O'Neal D. Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry. *Article in ASHRAE Transactions*. July 1984. No 2843. 14 p.
- Lee K.-S., Jhee S., Yang D.-K. Prediction of the frost formation on a cold flat surface. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2003. No 46. P. 3789–3796.
- Wang W., Guo Q. C., Lu W. P., Feng Y. C., Na W. A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate. *Int. J. Refrigeration*. 2012. No 35. P. 475–486.
- Yun R., Kim Y., Min M. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate. *Int. J. Refrigeration*. 2002. No 25. P. 362–371.
- Şahin A. Z. An experimental study on the initiation and growth of frost formation on a horizontal plate. *Experimental Heat Transfer. A J. Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*. 1994. vol. 7. no 2. P. 101–119.
- Shin J., Tikhonov A. V., Kim C. Experimental Study on Frost Structure on Surfaces With Different Hydrophilicity: Density and Thermal Conductivity. *Transactions of the ASME*. February 2003. Vol. 125, P. 84–94.
- Kandula M. Frost growth and densification on a flat surface in laminar flow with variable humidity. *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*. 2012. No 39. P. 1030–1034.
- Hayashi Y., Aoki A., Adachi S., Hori K. Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types. *J. Heat Transfer*. May 1977. vol. 99. P. 239–245.
- Lee Y. B., Ro S. T. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. *Exp. Thermal and Fluid Science*. 2005. No 29. P. 685–696.
- Kim D., Kim C., Lee K.-S. Frosting model for predicting macroscopic and local frost behaviors on a cold plate. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2015. no 82. P. 135–142.
- Yang D.-K., Lee K.-S., Song S. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2006. No 49. P. 1472–1479.
- Yang D. K., Lee, Kim H. D., Soo J., Soo L. K. Modeling of Frost Behavior on a Cold Plate. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2004. P. 717.
- Hermes C. J. L., Nascimento V. S. Jr., Loyola F. R. A dimensionless correlation for the frost density. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). November 3–7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil. P. 2649–2654.
- Knabben F. T., Hermes C. J. L., Melo C. In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances. *Int. J. Refrigeration*. 2011. no 34. P. 2031–2041.
- Silva D., Hermes C. Defrost cycle optimization for fan-supplied tube-fin evaporators subjected to frosting conditions. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2018. P. 2107.
- Yang D.-K., Lee K.-S. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. *Int. J. Refrigeration*. 2004. No 27. P. 89–96.
- Hermes C. J. L., Loyola F. R., Nascimento V. S. Jr. A semi-empirical correlation for the frost density. *Int. J. Refrigeration*. 2014. No 46. P. 100–104.
- Sommers A. D., Napora A. C., Truster N. L., Caraballo E. J., Hermes C. J. L. A semi-empirical correlation for predicting the frost density on hydrophilic and hydrophobic substrates. *Int. J. Refrigeration*. 2017. No 74. P. 313–323.
- Loyola F. R., Hermes C. J. L. Modeling of frost buildup in laminar channel flows. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) November 3–7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil. P. 2640–2647.

Сведения об авторах

Кошелев Валерий Леонидович

К. т. н., генеральный директор ООО «РЕФИМПЭКС», 236022, Калининград, Гвардейский пр., 15.

Ейдеюс Альгирдас Иозапович

К. т. н., доцент, КГТУ, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, eydeyus@mail.ru

Кошелев Сергей Валерьевич

К. т. н., заведующий лабораторно-исследовательским центром холодильных систем кафедры судовых энергетических установок, КГТУ, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6, koshelev.sv@bgarf.ru

Information about authors

Koshelev Valery L.

Ph. D., General Director of REFIMPEX LLC, 15 Gvardeysky Prospekt, Kaliningrad, 236022.

Eideyus Algirdas I.

Ph. D., Associate Professor, KSTU Baltic Fishing Fleet State Academy, 236035, Russia, Kaliningrad, Molodezhnaya, 6, eydeyus@mail.ru

Koshelev Sergey V.

Ph. D., Head of laboratory and research center of refrigeration systems of the Department of refrigeration, cryogenic engineering and air conditioning of KSTU Baltic Fishing Fleet State Academy, 236035, Russia, Kaliningrad, Molodezhnaya, 6, xktk@bga.gazinter.net



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник МАХ»

- В начале статьи, слева – УДК;
- После названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации (e-mail);
- Аннотация должна содержать от 150 до 200 слов. Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи. Ключевые слова – 5-7.

- **СТАТЬЯ ДОЛЖНА БЫТЬ СТРУКТУРИРОВАНА:**

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, провести краткий анализ известных из научной литературы решений (со ссылками на источники), дать критику их недостатков, показать научную новизну и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения.

В заключении (Выводы) необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований и области применения.

- статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word 97-2007 на одной стороне листа через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- объем статьи 15–20 страниц (формат А4, вертикальный, 210x297 мм), включая аннотацию, рисунки, литературу; поля: левое – 2 см, правое – 2 см, верхнее – 2 см, нижнее – 2 см;
- формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation), **не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab.**
- Список литературных источников должен быть оформлен по ГОСТу и содержать ссылки только на опубликованные работы. Самоцитирование не более 25%, список литературы должен содержать источники не старше 5 лет и включать в себя зарубежные публикации по данной тематике. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку их цитирования и заключаться в квадратные скобки. **Количество пристатейных ссылок не менее 15-20.**

Статьи, оформленные с нарушением правил, редакцией не принимаются и возвращаются авторам без рассмотрения по существу. Автор гарантирует отсутствие плагиата и иных форм неправомерного заимствования результатов других произведений.

Данные об аффилировании авторов (author affiliation).

На отдельной странице предоставляются сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), должности основного места работы (учебы); наименование и почтовые адреса учреждений, в которых работают авторы, e-mail.

Статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на электронный адрес редакции vestnikmax@rambler.ru

Плата за публикации не взимается

Дополнительная информация для авторов на сайте <http://vestnikmax.com>