



Исследование температурных режимов в сушильных камерах тентового типа

Введение

Процессы сборки металлических конструкций осуществляются по непрерывному циклу, и, когда температура окружающей среды имеет отрицательные значения, останавливать работу неэкономично и нецелесообразно. Для решения проблемы непрерывности производства для каждого из производственных процессов решается задача его реализации путём создания необходимых условий или адаптации оборудования к работе в неблагоприятных климатических условиях.

Одним из этапов металлосборки является окрашивание металлических конструкций с их последующей сушкой, при этом необходимо поддержание температуры, определяемой особенностями краски. Параметры процесса окрашивания и сушки должны соответствовать технологическим требованиям, и их поддержание является необходимым [1].

Длительность процесса сушки и высокая стоимость строительства специальных зданий для окрашивания и сушки краски, в которые необходимо транспортировать металлические модули, имеющие значительные размеры и массу (причём использование этих зданий необходимо только в зимний период), делают нерентабельным такой способ организации окрашивания. Решением этой проблемы

стало применение временных укрытий тентового типа, размещаемых на монтажной площадке рядом с местом сборки металлических конструкций.

Одним из этапов металлосборки является окрашивание металлических конструкций с их последующей сушкой, при этом необходимо поддержание температуры, определяемой особенностями краски. Параметры процесса окрашивания и сушки должны соответствовать технологическим требованиям

Анализ технологического сопровождения работы сушильных камер и литературных источников показал отсутствие готовых методов расчётов температурных режимов сушильных камер. Существующие эмпирические зависимости преимущественно описывают теплообмен в целях неограниченного размера, что не соответствует поставленной задаче [2–5]. Технологический контроль обычно сводится к измерению температур воздуха на входе и выходе из камеры без определения диапазона изменения температур самой камеры и окрашенной детали.

Рецензия эксперта на статью получена 07.03.2022 [The expert review of the article received on Mart 7, 2022].

УДК 629.128. Научная специальность: 05.14.04.

Исследование температурных режимов в сушильных камерах тентового типа

П. В. Яковлев, д.т.н., профессор, кафедра «Теплотехника и теплоэнергетика», Санкт-Петербургский горный университет (Горный университет); И. С. Просвирина, старший преподаватель, кафедра «Инженерные системы и экология», Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ)

В работе представлены результаты исследования влияния размеров укрытия, размеров окрашенного модуля, температур окружающей среды и воздуха после калорифера, параметров вентилятора, способов размещения вентилятора и вытяжной вентиляции на диапазон изменения температур воздуха в тентовом укрытии. На основе полученных результатов предлагается оптимальная конструкция тентового укрытия, получено критериальное уравнение и разработана программа по определению параметров воздуха после нагрева теплового вентилятором.

Ключевые слова: сушильная камера, тентовое укрытие, температурные поля, потоки воздуха, энергосбережение, тепловентилятор.

UDC 629.128. The number of scientific specialty: 05.14.04.

Investigation of temperature conditions in the drying chambers of the tent type when drying metal structures on the installation site at low ambient temperatures

P.V. Yakovlev, PhD, Professor, the Department of Heat Engineering and Heat Power Engineering, St. Petersburg Mining University; Ir.S. Prosvirina, Senior Lecturer, the Department of Engineering Systems and Ecology, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

The paper presents the results of a study of the effect of the size of the shelter, the size of the painted module, the temperatures of the environment and the air coming from the air heater, the parameters of the fan, the methods of placing the fan and exhaust ventilation on the range of air temperatures in the tent shelter. On the basis of the results obtained, an optimal design of an awning shelter is proposed, a criterion equation is obtained and a program for determining the parameters of air after heating with a fan heater is developed.

Key words: drying chamber, tent shelter, temperature fields, air flows, energy saving, fan heater.

Особенностями временного укрытия являются его большие размеры, малое термическое сопротивление тканевых или полимерных оболочек тента и использование воздушного отопления в виде мобильных калориферов. Кроме подвода теплоты система подачи воздуха решает задачу удаления испарившегося с окрашенной поверхности растворителя. Воздушное отопление характеризуется значительными изменениями температуры теплоносителя (воздуха) из-за его малой плотности и теплоёмкости. В сочетании со значительными потерями теплоты через тонкостенную оболочку проблема стабилизации температурного поля внутри шатра становится особенно сложной.

Управлять процессом сушки возможно изменением мест размещения калорифера и вытяжной вентиляции, тщательным подбором производительности вентилятора калорифера и температуры подаваемого воздуха. Решение этой технологической задачи и стало целью настоящего исследования.

1. Методы исследования. В ходе исследования применялись экспериментальный метод и метод численного моделирования. Численное моделирование позволило исследовать влияние на температурное поле в шатровом укрытии большого числа параметров в их широком диапазоне. Проверка адекватности полученных результатов выполнялась на экспериментальной установке сравнением полученных расчётных данных с измеренными температурами и скоростями движения воздуха в контрольных точках.

2. 3D-модель и граничные условия тентового укрытия. Создать необходимые условия для улучшения и ускорения окрашенных металлических изделий можно применив тентовые укрытия с каркасно-

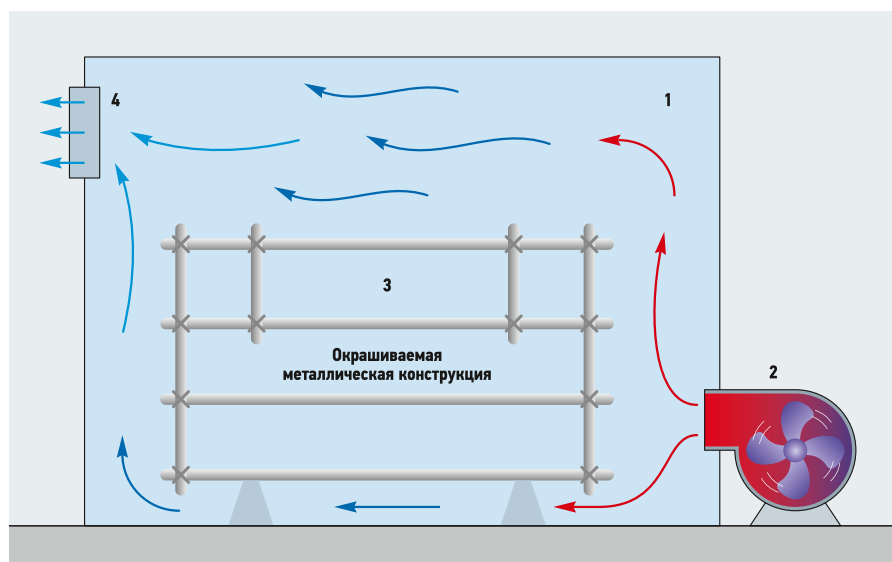


Рис. 1. Схема распределения потоков воздуха в сушильной камере (1 — сушильная камера; 2 — тепловентилятор; 3 — окрашенное изделие; 4 — вытяжное отверстие)

тентовой конструкцией. Модель окрасочной камеры тентового типа представляет собой металлический каркас с настилом, выполненным из полиэстера (например, PU 190T RipStop), имеющим устойчивость к солнечным лучам и неблагоприятным метеорологическим условиям (поверхность ткани хорошо отталкивает воду). Положительная температура внутри тентового укрытия поддерживается

тепловентилятором, расположенным снаружи и через нагнетательный патрубок подающим тёплый воздух непосредственно в укрытие (рис. 1).

Размеры тентовых укрытий напрямую зависят от размеров окрашиваемых секций судов. Диапазон определяющих параметров шатра обычно составляет $25 \times 25 \times 15$ м, а помещаемый модуль имеет размеры в диапазоне $20 \times 20 \times 10$ м [6].

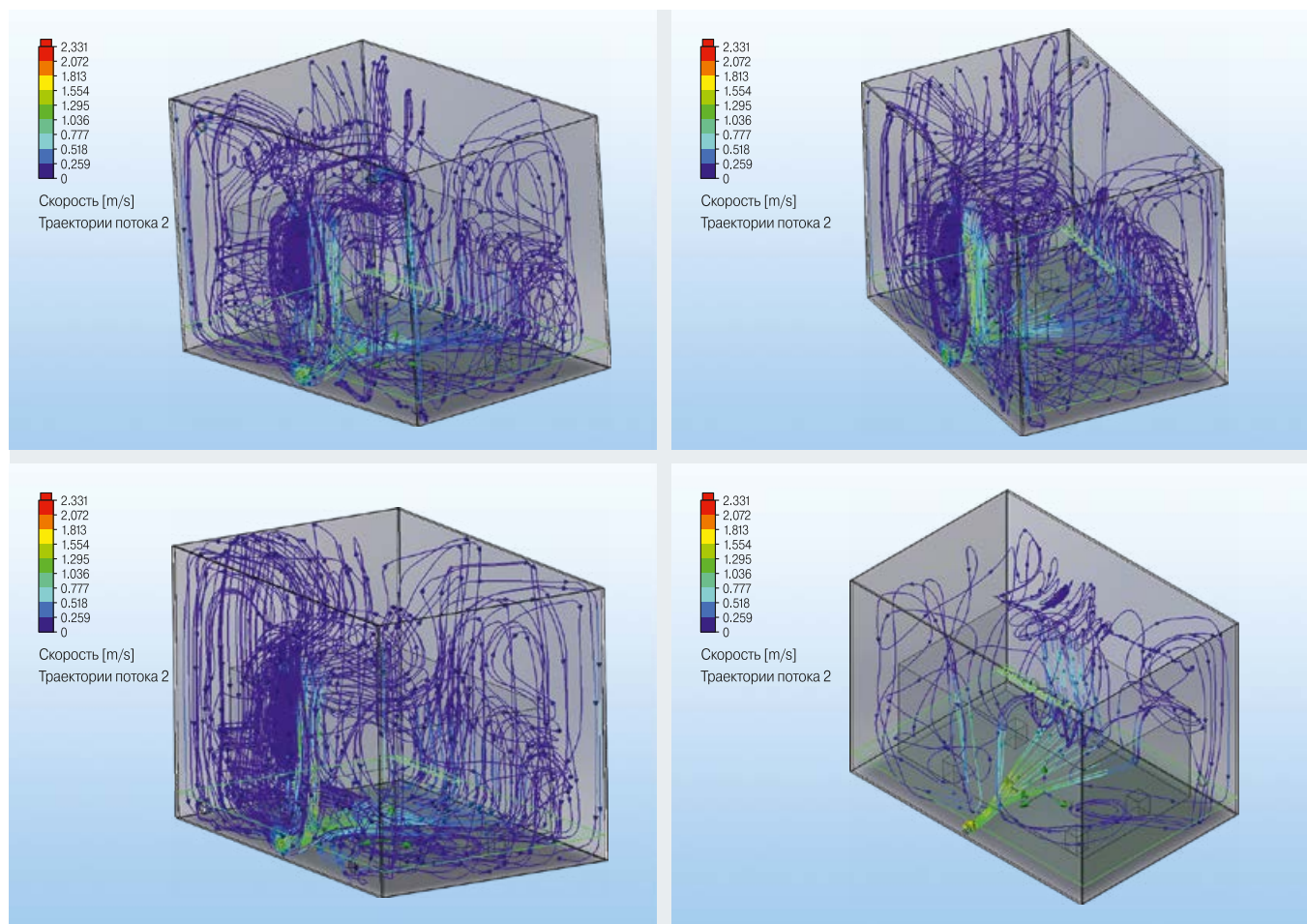
При решении задачи формирования температурных полей в тентовом укрытии задавались следующие начальные и граничные условия:

1. Температура внутренней поверхности тента определяется граничными условиями третьего рода, и она ниже температуры воздуха в тентовом укрытии, вследствие чего около ограждающей конструкции возникает свободная конвекция, при которой охлаждаемый стенкой воздух опускается вниз, а подаваемый в пространство между дном модуля корпуса судна и полом тёплый воздух поднимается вверх. Таким образом, в зазоре между боковой стенкой шатра и стенкой корпуса судна формируются два потока воздуха, движущиеся навстречу друг другу.
2. Тепловентилятор, нагревающий воздух, создаёт в тентовом укрытии вынужденное движение воздуха снизу вверх. Причём подача вентилятора калорифера зависит от аэродинамического сопротивления сушильной камеры. Поскольку скорость на входе определяется потерями давления в воздуховоде, на границе может быть задана только главная характеристика самого вентилятора.
3. За материал тента принят полистирол, материал окрашенной детали — конструкционная сталь.

Управлять процессом сушки возможно изменением мест размещения калорифера и вытяжной вентиляции, тщательным подбором производительности вентилятора калорифера и температуры подаваемого в сушильную камеру воздуха



Пример тента для промышленного применения на металлическом каркасе



• • Рис. 2. Распределение скоростей распространения воздуха внутри тентового укрытия

4. Температура воздуха, поступающего из калорифера, задаётся граничными условиями первого рода и составляет по рекомендациям технологии сушки 20°C [7], в выпускных отверстиях воздух имеет атмосферное давление.

5. В тентовом укрытии присутствует сложный теплообмен, который возможно описать граничным условием третьего рода — заданием коэффициентом теплопередачи с учётом теплопроводности материала тента. Коэффициент теплопередачи принят равным 15 Вт/(м²·К).

6. При обтекании окрашенной детали потоком воздуха передача тепла от воздуха к твёрдому телу происходит только на начальном этапе нагрева, а затем при установившемся стационарном режиме теплообмена принимается как граничное условие 4-го рода с равенством температур воздуха и модуля корпуса судна.

7. Выбор схемы подвода и отвода воздуха. На продолжительность и равномерность сушки оказывает большое влияние система распределения поступающего в камеру нагретого воздуха. По всей камере температура воздуха должна быть достаточно равномерной, только в этом случае высушенные покрытия приобретают необходимые свойства.

Для выбора оптимальной схемы выполнен сравнительный анализ различных схем сушки детали с одинаковыми параметрами укрытия.

Рассматривались четыре варианта размещения вытяжных отверстий удаления воздуха из тентового укрытия:

- вариант №1 — отверстия расположены сверху на расстоянии 1,5 м от верха тента на стенке приточного отверстия;
- вариант №2 — отверстия расположены сверху на расстоянии 1,5 м от верха тента на противоположной стенке;
- вариант №3 — отверстия расположены снизу на расстоянии 1,5 м от пола на стенке приточного отверстия;
- вариант №4 — отверстия расположены снизу на расстоянии 1,5 м от пола на противоположной стенке.

При удалении воздуха снизу (вариант №4) тёплый воздух поднимается и собирается в верхней части сушильной камеры, тем самым определяя более высокую температуру по всему объёму камеры. При удалении воздуха из верхней части (вариант №2) поднимающийся нагретый поток воздуха удаляется, в результате чего уменьшается среднее значение температуры по всему объёму камеры. Влияющими факторами являются вынуж-

денное движение воздуха от вентилятора калорифера и свободная конвекция, возникающая в результате охлаждения воздуха вблизи внешних стенок шатра. На эти процессы существенное влияние оказывают размеры высушиваемого модуля и самого тентового укрытия.



Несмотря на то, что при нижнем удалении достигается наибольшая температура воздуха, в верхней части тентового укрытия образовывается застойная зона, вследствие чего увеличивается концентрация паров краски. Об интенсивности удаления паров растворителя в разных частях камеры можно судить по характеру распределения скоростей распространения воздуха (рис. 2).

Сравнивая поля скоростей и траектории движения, можно видеть, что при верхнем удалении воздуха скорость выше. Объясняется это тем, что при движении горячего воздуха вверх архимедова сила помогает вентилятору, а вниз — мешает. Траектории же температур воздушной среды ещё раз подтверждают влияние свободной конвекции [8] — тёплые потоки воздуха собираются вверху. При нижнем удалении воздух лучше смешивается с холодными потоками, создавая более равномерное распределение температур по всему объёму сушильной камеры.

8. Энергосбережение в сушильной камере тентового типа. Для снижения мощности тепловентилятора применяется энергосберегающее тентовое укрытие [9].

Стенки тентового укрытия состоят из трёх слоёв: наружного и внутреннего с высоким термическим сопротивлением и среднего с низким термическим сопротивлением, позволяющего утилизировать теплоту вытяжного воздуха в зимний период года (рис. 3).

Холодный наружный воздух из окружающей среды поступает через проём 5 и направляется через воздушный зазор 8 сверху вниз к проёму 6, получая тепло через стенку шатра 3 с малым термическим сопротивлением. Затем нагретый воздух направляется к тепловентилятору через проём 6, где доводится до требуемой температуры. Одновременно отдавший тепло через стенку 3 воздушный поток из сушильной камеры выбрасывается в окружающую среду через проём 7.

Таким образом, энергосберегающее шатровое укрытие обеспечивает в зимнее время утилизацию внутреннего воз-



духа окрасочной камеры, уменьшая тем самым мощность тепловентилятора.

В результате численных и экспериментальных исследований получено критериальное уравнение для определения диапазона изменения температур изделия:

$$\theta = \Theta \left(0,0003 Ra^{2/3} + 0,41 Ra^{1/3} + 0,32 \right) \times \left\{ \left[\left(0,98 \frac{H}{e} - 4 \right) 10^{-16} \right] Ra^3 - \left[\Theta \left(0,12 \frac{H}{e} - 0,3 \right) 10^{-9} \right] Ra^3 + \left[-54 \Theta^2 + 64 \Theta - \left(16 \Theta^2 - 20 \Theta + 6 \right) \frac{H}{e} + 0,5 \right] 10^{-4} \right\} Re + 6,6 \left. \right\} 10^{-9},$$

где $T_{\max}$ — максимальная температура изделия; $T_{\min}$ — минимальная температура изделия; $T_{\text{кал}}$ — температура воздуха из калорифера; $T_{\text{окр.ср}}$ — температура окружающей среды;

$$\Theta = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}}{T_{\text{вент}} - T_{\text{нар}}}$$

безразмерный коэффициент; $T_{\text{вн}}$, $T_{\text{нар}}$ и $T_{\text{вент}}$ — температуры внутреннего, наружного воздуха и воздуха на выходе из тепловентилятора, соответственно; Ra — критерий подобия Релея; Re — критерий подобия Рейнольдса; H — высота шатрового укрытия; e — зазор между окрашиваемым модулем и полом.

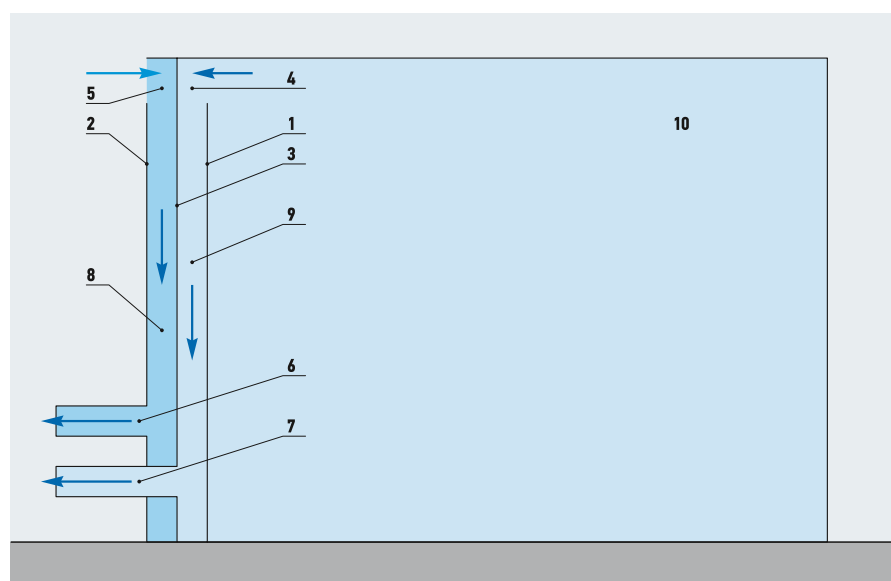


Рис. 3. Энергосберегающее тентовое укрытие (1 — внутренняя стенка шатра; 2 — внешняя стенка шатра; 3 — средняя стенка шатра; 4 — проём из сушильной камеры; 5 — проём из окружающей среды; 6 — проём к калориферу; 7 — проём в окружающую среду; 8 и 9 — воздушные зазоры; 10 — кровельное покрытие)

Заключение

В работе исследовано распределение температур по всему объёму сушильной камеры. Нагрев воздуха с помощью теплогенератора позволяет получить температуру воздуха внутри тентового укрытия на уровне $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Наряду с этим аэродинамическое сопротивление камеры и способ отвода воздуха влияет на все её параметры, что также требует учёта при подборе калориферов.

Экспериментальная проверка полученных зависимостей показала сходимость результатов расчётов с измеренными значениями температур. Погрешность величины температурного напора не превышает 15 %

Получено критериальное уравнение, позволяющее определить понижение температуры относительно температуры воздуха на выходе из калорифера. Для автоматизации расчёта по полученному уравнению предложена программа для определения параметров воздуха внутри сушильной камеры тентового типа [10].

Экспериментальная проверка полученных зависимостей показала сходимость результатов расчётов с измеренными значениями температур. Погрешность величины температурного напора не превышает 15 %.

- ГОСТ 9.105–80. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрывания лакокрасочные. Классификация и основные параметры методов окрашивания. — М.: Изд-во стандартов, 1980. 15 с.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. 325 с.
- Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — М.-Л.: Машгиз, 1962. 456 с.
- Луканин В.Н. и др. Теплотехника: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. — М.: Высшая школа, 2000. 671 с.
- Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. Пер. с англ. / Под ред. А.В. Лыкова. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 681 с.
- Изготовление узлов, секций и блоков секций корпуса. Разбивка корпуса на узлы и секции. Их классификация [Электр. текст]. Stroitelstvo-New. Режим доступа: stroitelstvo-new.ru. Дата обрац.: 10.02.2022.
- РД 31.52.17–86. Рекомендации по искусственному обогреву при окрашивании судов в доках. — М.: Минморфлота СССР, 1986. 45 с.
- Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. — Новосибирск: Наука, 1986. 297 с.
- Патент РФ №201290 U1. МПК E04H 15/14, E04B 2/42. Энергосберегающее шатровое укрытие / И.С. Просвирина, П.В. Яковлев. Патентообл.: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», №2020121684; заявл. 25.06.2020; опубл. 08.12.2020. Бюл. №34.
- Свид-во о регистр. програм. для ЭВМ №2021615817 (РФ). Определение параметров воздуха в сушильной камере шатрового типа / И.С. Просвирина, П.В. Яковлев. Патентообл.: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», №2021612355; заявл. 24.02.2021; опубл. 13.04.2021. 41 КБ.

References — see page 80.

Investigation of temperature conditions in the drying chambers of the tent type when drying metal structures on the installation site at low ambient temperatures. Pp. 44–47.

Pavel V. Yakovlev, PhD, Professor, the Department of Heat Engineering and Heat Power Engineering, [St. Petersburg Mining University](#); **Irina S. Prosvirina**, Senior Lecturer, the Department of Engineering Systems and Ecology, [Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering](#)

1. GOST 9.105–80 [State Industry Standard of Russia No. 9.105–80]. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija lakokrasochnye. Klassifikacija i osnovnye parametry metodov okrashivanija* [Unified system of protection against corrosion and aging. Paint coatings. Classification and basic parameters of staining methods]. Moscow. *Izd-vo standartov* [State standards publishing house of the USSR]. 1980. 15 p. [In Russian]
2. A.B. Lykov. *Teorija teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow. *Vyshaja shkola* ["Higher education" Publishing House]. 1967. 325 p. [In Russian]
3. S.S. Kutateladze. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow-Leningrad. *Mashgiz* ["Engineering Industry" State Publishing House ("Mashgiz" Publishers)]. 1962. 456 p. [In Russian]
4. V.N. Lukanin et al. *Teplotehnika: uchebnyj dlja vuzov* [Heat engineering. A textbook for high schools]. 2nd edition, rev. and exp. Moscow. *Vyshaja shkola* ["Higher education" Publishing House]. 2000. 671 p. [In Russian]
5. Je.R. Jekkert, R.M. Drek. *Teorija teplo- i massobmena* [Theory of heat and mass transfer]. Transl. from English. Edited by A.V. Lykova. Moscow, Leningrad. *Gosenergoizdat* [State publishing house of literature on the energy industry of the USSR ("Gosenergoizdat" Publishers)]. 1961. 681 p. [In Russian]
6. *Izgotovlenie uzlov, sekcij i blokov sekcij korpasa. Razbivka korpasa na uzly i sekcii. Ih klassifikacija* [Manufacture of units, sections and blocks of hull sections. Breakdown of the hull into nodes and sections. Their classification]. *Stroitelstvo-New*. Web-source: stroitelstvo-new.ru. Access data: February 10, 2022. [In Russian]
7. RD 31.52.17–86 [Working documentation No. 31.52.17–86]. *Rekomendacii po iskusstvennomu obogrevu pri okrashivanii sudov v dokah* [Recommendations for artificial heating when painting ships in docks]. Moscow. *Minmorflota SSSR* [Ministry of Merchant Marine of the USSR]. 1986. 45 p. [In Russian]
8. S.S. Kutateladze. *Analiz podobija i fizicheskie modeli* [Similarity analysis and physical models]. Novosibirsk. *Nauka* ["The science" Publishers]. 1986. 297 p. [In Russian]
9. Patent of Russia No. 201290 U1. IPC E04H 15/14, E04B 2/42. *Jenergoberegajushhee shatrovoe ukrytie* [Energy saving tent shelter]. Ir.S. Prosvirina, P.V. Jakovlev. Patent holder: GAOU AO VO "AGASU" [Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering], No. 2020121684. Decl.: June 25, 2020. Publ.: December 8, 2020. Bul. No. 34. [In Russian]
10. Russia certificate of registration of the computer program No. 2021615817. *Opreделение параметров воздуха в сушильной камере шатрового типа* [Determination of air parameters in a tent-type drying chamber]. Ir.S. Prosvirina, P.V. Jakovlev. Patent holder: GAOU AO VO "AGASU" [Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering], No. 2021612355. Decl.: February 24, 2021. Publ.: April 13, 2021. 41 KB. [In Russian]