

Инженерная методика расчёта воздухообмена для удаления влаги и веществ, вызывающих запах, на предприятиях рыбоперерабатывающей промышленности

Рецензия эксперта на статью получена 23.05.2019 [Expert review on the article received on May 23, 2019].

Поддержание воздушно-теплого микроклимата в рабочей зоне помещения на предприятии играет важную роль в обеспечении технологического процесса. Обеспечение комфортного пребывания людей в рабочей зоне содержит ряд проблемных вопросов. Расчётные воздухообмены в помещении по выделениям теплоты или влаги в некоторых случаях оказываются недостаточными для удаления веществ, вызывающих резкие и неприятные запахи. Несмотря на то, что по нормативным требованиям ГОСТ 12.1.005–88 [1] и СанПиН 2.2.4.548–96 [2] устанавливаются нормативные конкретные значения ПДК вредностей в воздушной среде, вопросы расчёта воздухообмена для борьбы с запахами остаются нерешёнными. В число этих задач, в частности, входит определение количества выделяемых пахучих веществ.

Для поддержания концентраций веществ, вызывающих запах, необходимо производить отдельные расчёты. Ниже продемонстрированы те случаи, когда воздухообмены для удаления влаги оказываются недостаточными для удаления запахов.

В данной статье предложена методика расчёта как количества влаги, поступающей в воздушную среду с поверхности рыбы, так и количества выделяемых веществ, вызывающих резкие и неприятные запахи. Эта методика позволяет рассчитывать необходимый воздухообмен в помещении для переработки рыбы, причём точнее, чем было в проектной практике до настоящего времени.

В процессе бактериального разложения рыбы характерно присутствие летучих азотистых соединений: аммиака NH_3 , монометиламина H_2CH_3 , диметиламина $\text{NH}(\text{CH}_3)_2$, триметиламина $\text{N}(\text{CH}_3)_3$ и триэтиламина $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$. Именно для этих веществ характерны неприятные запахи. По содержанию этих веществ в рыбе также определяют её свежесть.

Хотя по нормативным требованиям ГОСТ 12.1.005–88 и СанПиН 2.2.4.548–96 устанавливаются нормативные конкретные значения предельно допустимых концентраций вредностей в воздушной среде, вопросы расчёта воздухообмена для борьбы с запахами остаются нерешёнными. В число этих задач, в частности, входит определение количества выделяемых пахучих веществ

Количественное содержание летучих соединений определяется в ходе микробиологического анализа. Из общего количества летучих азотистых соединений выделяют содержание триметиламина как наиболее токсичного и пахучего компонента неприятного запаха.

В свежей, только что уснувшей рыбе содержание летучих азотистых соединений находится в пределах 15–17 мг/кг*, в процессе разложения это количество увеличивается. В результате разложения содержание аммиака может увеличиться в пять–десять раз и достигать у рыб 175 мг/кг, а содержание упомянутого триметиламина — до 160 мг/кг [4].

При соприкосновении поверхности рыбы с воздушной средой идёт испарение жидкости со слизистой оболочки и жабр рыбы, а также от внутренних частей при потрошении. При этом технологическом процессе с испарившейся жидкостью в воздух поступают данные вещества, формирующие резкие и неприятные запахи.

Основными критериями количественного поступления этих веществ являются: разновидность рыбы; время, которое прошло с момента вылавливания; температура, при которой хранилась или транспортировалась рыба; площадь поверхности рыбы, соприкасающаяся с воздушной средой помещения.

УДК: 697.956.05.23.03. Научная специальность: 05.23.03.

Инженерная методика расчёта воздухообмена для удаления влаги и веществ, вызывающих запах, на предприятиях рыбоперерабатывающей промышленности

Виталий И. Прохоров, д.т.н., профессор; **Егор В. Малых**, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

В статье рассматривается борьба с запахами на рыбоперерабатывающем предприятии. На основании сравнительных расчётов выяснены границы минимального воздухообмена для конкретных начальных условий. Разработана методика расчёта выделений влаги и пахучих веществ с поверхности рыбы в рабочую зону.

Ключевые слова: переработка рыбы, инженерная методика, воздухообмен, вентиляция, запахи, борьба с запахами.

UDC: 697.956.05.23.03. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Engineering method of calculation of air exchange for removal of moisture and substances that cause odor at fish processing plants

Vitalij I. Prohorov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Egor V. Malykh**, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

The article discusses the odor control in the fish processing enterprise. Based on comparative calculations, the boundaries of the minimum air exchange for specific initial conditions have been clarified. A method has been developed for calculating the discharge of moisture and odorous substances from the fish surface into the working area.

Key words: fish processing, engineering method, air exchange, ventilation, odors, odor control.



Сущность методики расчёта заключается в применении закона Дальтона для нахождения массы газообразного вещества, поступившего в атмосферу помещения вместе с испарившейся жидкостью с поверхности рыбы.

В этой методике считается, что в слизистой оболочке на поверхности рыбы содержится такое же количество пахучих веществ, сколько и в мышцах рыбы. В слизистой оболочке находится меньшее количество упомянутых веществ, чем в мышцах. Однако, с учётом поступления данных летучих азотистых соединений с поверхности жабр и при потрошении, можно считать их равными.

Масса воды, испарившаяся в воздушную среду по закону Дальтона, определяется по выражению [3]:

$$W = \beta(p_{\text{нас}} - p_{\text{вп}})A, \text{ кг/ч}, \quad (1)$$

где $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенных водяных паров над поверхностью воды при температуре внутреннего воздуха в помещении, Па; $p_{\text{вп}}$ — парциальное давление водяных паров воздуха в помещении, Па; A — площадь поверхности слизистой оболочки рыбы, соприкасающаяся с воздушной средой в помещении, м^2 (следует отметить, что площадь слизистой оболочки рыбы можно считать постоянной из-за непрерывного процесса большого количества перерабатываемой рыбы, определение данной площади зависит от средних размеров перерабатываемых тушек рыбы, от их количества, подаваемого на ленту за час, и от площади ленты конвейера, причём необходимо учитывать площадь остаточной «слизи», поступающей со слизистой оболочки рыбы на рабочую поверхность конвейера), можно ориентировочно принять $A = 2,0 - 2,5 A_{\text{конв}}$, где $A_{\text{конв}}$ — площадь поверхности конвейера,

Значение коэффициентов B и n

Re	B	n
$3,15 \times 10^3 - 2,20 \times 10^4$	0,4900	0,61
$2,20 \times 10^4 - 3,15 \times 10^5$	0,0248	0,90

табл. 1

на котором располагается рыба, м^2 ; β — коэффициент влагообмена в помещении, отнесенный к разности давлений водяного пара, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Для определения β воспользуемся методикой расчёта испарения жидкости с водного зеркала при помощи уравнений подобия на основе исследований профессора А.В. Нестеренко [3].

Коэффициент влагообмена находится по формуле:

$$\beta = \frac{Nu' D'}{l}, \quad (2)$$

где Nu' — диффузионный критерий Нуссельта; l — определяющий размер, м (для испарения с поверхности рыбы, находящейся на ленте конвейера, принимается сторона квадрата, равновеликого по площади поверхности ленты конвейера, на поверхности которой располагается рыба); D' — коэффициент диффузии, отнесенный к градиенту парциального давления $[\text{м}/\text{ч}]$, который можно определить по следующей формуле:

$$D' = \frac{D}{RT}, \quad (3)$$

здесь T — абсолютная температура воздушно-паровой смеси, К ; R — газовая постоянная водяного пара, равная $461 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; D — коэффициент диффузии водяного пара, $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$D = 0,0754 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,89} \frac{101325}{B}, \quad (4)$$

где B — барометрическое давление, Па.

Диффузионный критерий Нуссельта Nu' вычисляется для условия вынужденной конвекции по формуле:

$$Nu' = B Re^n (Pr')^{0,33} Gu^{0,135} \theta^2. \quad (5)$$

Здесь Pr' — диффузионный критерий Прандтля, определяемый по формуле:

$$Pr' = \frac{\nu}{D}, \quad (6)$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; Re — критерий Рейнольдса, определяемый по формуле:

$$Re = \frac{vl}{\nu}, \quad (7)$$

где v — скорость воздуха над поверхностью рыбы $[\text{м}/\text{с}]$, которую можно определить следующим образом:

$$v = \sqrt{v_{\text{в}}^2 + v_{\text{к}}^2}, \quad (8)$$

где $v_{\text{в}}$ — подвижность воздуха в рабочей зоне помещения, $\text{м}/\text{с}$; $v_{\text{к}}$ — скорость движения ленты конвейера, $\text{м}/\text{с}$; Gu — критерий Гухмана, определяемый по формуле:

$$Gu = \frac{T_{\text{с}} - T_{\text{м}}}{T_{\text{с}}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{с}}$ и $T_{\text{м}}$ — абсолютные температуры по сухому и мокрому термометрам, К ; θ — температурный фактор, определяемый по формуле:

$$\theta = \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{п}}}, \quad (10)$$

где $T_{\text{п}}$ — абсолютная температура поверхности жидкости, К .

Коэффициенты B и n при расчёте Nu' для условия вынужденной конвекции приведены в табл. 1.

Количество выделяемых веществ, поступающих в воздушную среду помещения вместе с испарившейся влагой:

$$M_0 = 1,5 W \mu \vartheta, \text{ мг/ч}, \quad (11)$$

где μ — массовая доля пахучего вещества, содержащаяся в 1 кг мягких тканей рыбы $[\text{мг}/\text{кг}]$, определяется в ходе микробиологического анализа перерабатываемой рыбы; ϑ — поправочный коэффициент, зависящий от состояния рыбы: если рыба не промыта в проточной воде, то принимается $\vartheta = 1$, а если промыта, то поправочный коэффициент составит $\vartheta = 0,2$.

Коэффициент $1,5$, принятый в данной статье, учитывает увеличение скорости испарения летучих азотистых соединений по сравнению с водяным паром.

* Размерность $[\text{мг}\%]$ (миллиграмм-процент) означает количество миллиграммов (мг) расчётного вещества, содержащееся в 100 мл исследуемого раствора или в 100 г твёрдого вещества.

Данный коэффициент вводится, чтобы учесть отличающиеся свойства летучих азотистых соединений по сравнению с водяным паром.

В технологическом процессе после прохождения рыбы через машины для промывки часть слизистой оболочки смывается. Поскольку рыбу опрыскивают водой через форсунки или промывают водой во вращающемся барабане, вместе со смывой слизистой оболочкой уменьшается концентрация пахучих веществ на поверхности рыбы. Следовательно, поступление пахучих веществ в воздушную среду помещения также уменьшается. Поэтому необходимо производить отдельный расчёт для частей конвейера, где рыба промыта и где не промыта.

Воздухообмен $[м^3/ч]$ для удаления ароматических веществ определяется по общеизвестной формуле [3]:

$$L = \frac{M}{\Delta c} = \frac{M}{c_{ПДК} - c_0}, \quad (12)$$

где $c_{ПДК}$ — ПДК вещества в помещении по санитарным требованиям, $мг/м^3$; c_0 — концентрация веществ в приточном воздухе, поступающем в помещение, $мг/м^3$; $\Delta c = c_{ПДК} - c_0$ — разность концентраций по ПДК и воздуха, поступающего в помещение, $мг/м^3$.

Необходимо производить расчёт для каждого ароматического вещества из-за различных концентраций $c_{ПДК}$ по санитарным требованиям и выбирать для дальнейших расчётов наибольшее значение воздухообмена.

Из-за значительных выделений влаги целесообразно сравнивать необходимые воздухообмены для удаления избытков влаги, определённые по формуле (1), и для удаления ароматических веществ, определённых по формуле (11).

Воздухообмен $[м^3/ч]$ для удаления избыточной влаги определяется по общеизвестной формуле [3]:

$$L = \frac{W}{\Delta d \rho} \times 10^3 = \frac{W}{(d_y - d_n) \rho} \times 10^3, \quad (13)$$

где ρ — плотность приточного воздуха, $кг/м^3$; d_y — влагосодержание удаляемого воздуха, $г/кг$ сух. возд.; d_n — влагосодержание приточного воздуха, $г/кг$ сух. возд.; $\Delta d = d_y - d_n$ — разность влагосодержания удаляемого и приточного воздуха, $г/кг$ сух. возд.

Для примера используем следующие данные: вид рыбы — лосось; температура в рабочей зоне $t_b = 18^\circ C$, относительная влажность воздуха — $\varphi = 40\%$; подвижность воздуха в рабочей зоне помещения $v_b = 0,5$ м/с; скорость конвейера $v_k = 0,5$ м/с; доля триметиламина, содер-

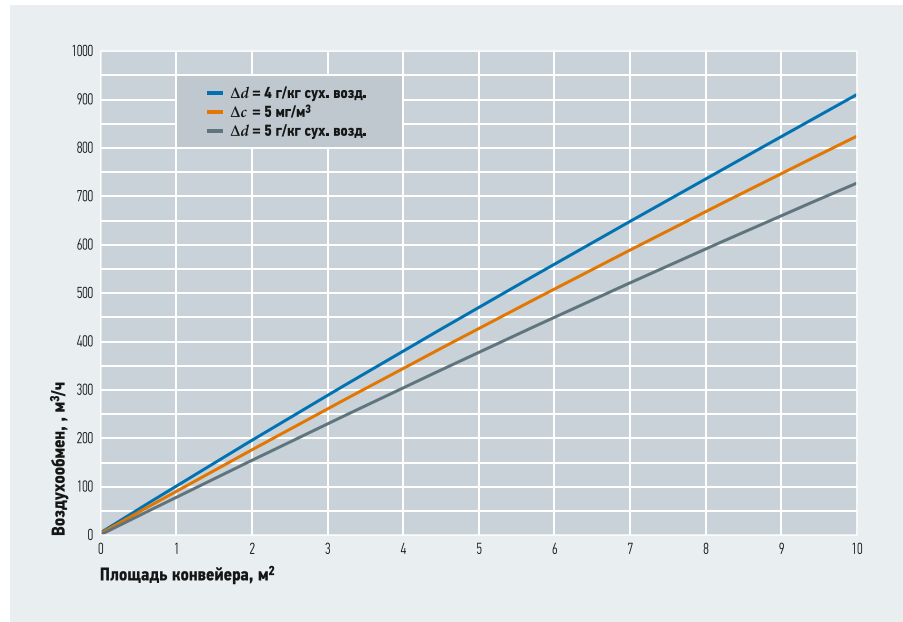


Рис. 1. График зависимости воздухообмена на удаление избытков влаги и ароматических веществ от площади конвейера

жащаяся в 1 кг мягких тканей лосося, принимается $\mu = 66$ мг/% = 660 мг/кг. Результаты вычислений показаны на рис. 1.

Линия 1 показывает зависимость воздухообмена от площади конвейера при разнице влагосодержания $\Delta d = 4$ г/кг сух. возд.; линия 2 показывает зависимость воздухообмена от площади конвейера при разнице концентраций воздуха в рабочей зоне по санитарным требованиям для триметиламина и приточного воздуха $\Delta c = 5$ мг/м³; линия 3 показывает зависимость воздухообмена от площади конвейера при разнице влагосодержания $\Delta d = 5$ г/кг сух. возд.

Как видно из рис. 1, необходимый воздухообмен на поддержание санитарных требований для триметиламина находится между воздухообменами на удаление избытков влаги с разницей влагосодержания приточного и удаляемого воздуха 4 и 5 г/кг сух. возд.

Рассмотренная задача показывает, что для борьбы с запахами, в данном случае с триметиламином, требуется воздухообмен как при борьбе с влагой при изменении влагосодержания не более 4,5 г/кг сух. возд. Если разность влагосодержания $\Delta d = 5$ г/кг сух. возд., то воздухообмен, необходимый для устранения «вредностей», оказывается недостаточным.

При большой разнице влагосодержания приточного и удаляемого воздуха (в нашем случае это 4,5 г/кг сух. возд.) может появиться необходимость осуществлять расчёты для удаления избытков ароматических веществ в рабочей зоне для соответствия качества воздуха санитарным требованиям

Гарантированный воздухообмен для удаления и влаги, и запаха оказывается при $\Delta d = 4$ г/кг сух. возд.

Вывод

Описанная методика расчёта поступлений ароматических веществ в воздушную среду рабочей зоны позволяет приблизительно рассчитывать воздухообмен для удаления веществ, вызывающих резкие и неприятные запахи. Она также показывает, что при большой разнице влагосодержания приточного и удаляемого воздуха (в нашем случае это 4,5 г/кг сух. возд.) может появиться необходимость осуществлять расчёты для удаления избытков ароматических веществ в рабочей зоне для соответствия качества воздуха санитарным требованиям.

В настоящее время в общедоступных источниках литературы [4–8] способы количественного определения выделяемых пахучих веществ в воздушную среду помещения не освещены.

- ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. — М.: Стандартинформ, 2006.
- СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. — М.: Минздрав России, 2001.
- Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. 460 с.
- Репников Б.Т. Товароведение и биохимия рыбных товаров. — М.: ИТК «Дашков и Ко», 2007. 220 с.
- Ершов А.М., Касьянов Г.И., Пархоменко Г.Д. Проектирование рыбоперерабатывающих производств. — Краснодар: Изд-во «Экоинвест», 2002. 180 с.
- Штокман Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. — М.: Изд-во «АСВ», 2008. 636 с.
- Малова Н.Д. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию пищевой промышленности. — М.: «Термокул», 2005. 304 с.
- Виноградов Ю.Н., Косой В.Д., Новик О.Ю. Проектирование предприятий мясо-молочной отрасли и рыбоперерабатывающих производств. — СПб.: Изд-во «Гиорд», 2005. 328 с.

References — see page 94.

Engineering method of calculation of air exchange for removal of moisture and substances that cause odor at fish processing plants. Pp. 56–58.

Vitalij I. Prohorov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Egor V. Malykh**, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. GOST [State industry standard of Russia] 12.1.005–88. *Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduhu rabochej zony* [The system of labor safety standards. General sanitary and hygienic requirements for working area air]. Moscow. *Standartinform* [The Federal State Unitary Enterprise “Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment”]. 2006. [In Russian]
2. SanPiN [Sanitary Norms and Regulations of Russia (Russian Public Health Regulations)] 2.2.4.548–96. *Gigienicheskie trebovaniya k mikroklimatu proizvodstvennyh pomeshhenij* [Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises]. Moscow. *Minzdrav Rossii* [The Ministry of Health of the Russian Federation]. 2001. [In Russian]
3. Nesterenko A.V. *Osnovy termodinamicheskikh raschjotov ventiljacii i kondicionirovaniya vozduha* [Basics of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning]. Moscow. *Vyshshaja shkola* [“Higher education” Publishing House]. 1971. 460 p. [In Russian]
4. Repnikov B.T. *Tovarovedenie i biohimija rybnih tovarov* [Merchandising and biochemistry of fish products]. Moscow. *ITK “Dashkov i Ko”* [“Dashkov i Ko” Publishing and Trading Corp.]. 2007. 220 p. [In Russian]
5. Ershov A.M., Kas’janov G.I., Parhomenko G.D. *Proektirovanie rybopererabatyvajushhih proizvodstv* [Design of fish processing plants]. Krasnodar. *Izd-vo “Jekoinvest”* [“Ecoinvest” Publishing House]. 2002. 180 p. [In Russian]
6. Shtokman E.A. *Ventiljacija, kondicionirovanie i ochildka vozduha na predpriyatijah pishhevoj promyshlennosti* [Ventilation, air conditioning and air purification at food industry enterprises]. Moscow. *Izd-vo “ASV”* [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2008. 636 p. [In Russian]
7. Malova N.D. *Sistemy ventiljacii i kondicionirovaniya. Rekomendacii po proektirovaniju pishhevoj promyshlennosti* [Ventilation and air conditioning systems. Recommendations for the design of the food industry]. Moscow. *“Termokul”* [“Thermocool”, LLC]. 2005. 304 p. [In Russian]
8. Vinogradov Ju.N., Kosoj V.D., Novik O.Ju. *Proektirovanie predpriyatij mjasomolochnoj otrasli i rybopererabatyvajushhih proizvodstv* [Design of enterprises of meat and dairy industry and fish processing plants]. St. Petersburg. *Izd-vo “Giord”* [“Giord” Publishing House]. 2005. 328 p. [In Russian]