

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬЕРЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Введение

Если явление, связанное с движением жидкости, не может быть описано математически с достаточной точностью, прибегают к экспериментальному изучению этого явления на моделях.

Моделирование – исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания явлений, интересующих исследователей.

В области, которая может быть названа «моделированием», относящимся к исследованию различных физических явлений, необходимо различать два вида моделирования:

1) физическое моделирование: в этом случае на модели воспроизводится изучаемое явление с сохранением его физических свойств;

2) математическое моделирование: в этом случае исследование естественных состояний или процессов выполняется путем изучения явлений, имеющих иное физическое содержание, однако описываемое теми же математическими зависимостями. К математическому моделированию следует отнести и расчеты тех или других процессов, выполняемые по специально составленным программам на ЭВМ [1].

Физическое моделирование, производство и испытание деталей является достаточно дорогостоящим. При этом с применением программного обеспечения для мультифизического моделирования (например, COMSOL Multiphysics) позволяет определить параметры проектируемого объекта, а также различные оценить физические явления, рассчитав необходимые размеры и формы, обеспечивающие требуемую производительность. И только потом изготовить физический объект и провести натурные испытания.

Цель работы

Создание детали, фильеры для изготовления двухкомпонентных кондитерских изделий, ее формы и параметров для оптимальной производительности.

Модель

Для решения нашей задачи мы использовали *COMSOL Multiphysics*. Используем именно *COMSOL Multiphysics* так, как программа имеет модули, которые описывают различные физические явления, и эти модули могут взаимодействовать между собой, обмениваясь информацией.

Для решения поставленной задачи мы импортируем геометрию фильеры. Данный импортируемый файл является 3D CAD file (3D-файлом САПР) (см. рисунок 1).

Трехмерных твердотельные объекты получены из двумерных сечений или граней путем выдавливания 2D-объекта в 3D-объект.

Фильтера имеет два отверстия на выходе, так как через каждое из них будет проходить соответствующий вид теста.

Была выбрана рабочая плоскость, указанная на *рисунке 2*.

Для определения 2D-объектов в 3D создана рабочая плоскость путем выдавливания 2D-объекта в 3D-объект.

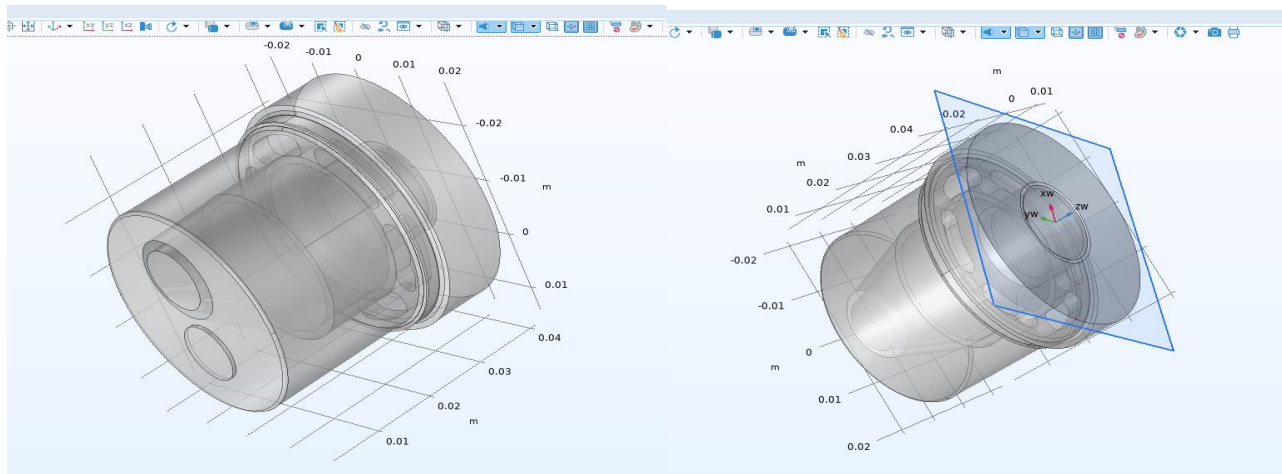


Рисунок 1 – Геометрия фильеры

Рисунок 2 – Рабочая плоскость

Рабочая плоскость – это 2D-плоскость, ориентированная в любом месте 3D-пространства.

С помощью операции *Remove Details* удаляем из геометрии фильеры такие мелкие детали, как вершины с непрерывной касательной, короткие ребра, маленькие и узкие грани, узкие области граней и тонкие домены, которые могут значительно увеличить количество элементов сетки.

Далее добавляем материал для вязкого теста, проходящего через фильеру. Данным материалом будет Pasta 30 % hydration. Зададим ей имя «mat1». Также зададим этому материалу следующие свойства: basic (базовый) и power law (сила закона). К базовым свойствам относятся теплопроводность $k_{iso} = 0.242 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ плотность $\rho = 1200 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. К свойствам силы закона относятся два параметра: коэффициент консистенции жидкости $m_{pow} = m_{30}(T)/10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и индекс поведения потока $n_{pow} = n_{30}(T)$. Тесто находится под давлением $p = 2 \text{ МПа}$.

Уравнения, решаемые интерфейсом *Creeping Flow*, представляют собой уравнения Навье-Стокса для сохранения количества движения и уравнения неразрывности для сохранения массы.

Интерфейс *Creeping Flow* можно использовать для стационарного и зависящего от времени анализа.

Уравнение, которым описывается движение жидкости:

$$0 = \nabla \cdot [-pl + K] + F,$$

где p – давление, l – геометрических параметр, F – объемная сила.

Для интерфейсов Turbulent Flow узел Fluid Properties также добавляет уравнения для уравнений переноса турбулентности.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0;$$

$$K = \mu_{app} (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu_{app} (\nabla u) l;$$

$$\mu_{app} = m \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{n-1};$$

$$\dot{\gamma} = \max(\sqrt{2S} : S, \dot{\gamma}_{min});$$

$$S = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T]$$

где p – давление, l – геометрических параметр, F – объемная сил, ρ – плотность,

m – коэффициент консистенции жидкости, n – индекс поведения потока, $\dot{\gamma}_{ref}$ обозначается эталонная скорость сдвига и $\dot{\gamma}_{min}$ является нижним пределом скорости сдвига, u – скорость

Тесто демонстрирует истончение при сдвиге (псевдопластичность). Чтобы избежать нефизической бесконечной вязкости при нулевой скорости сдвига COMSOL Multiphysics реализует модель степенного закона следующим образом:

$$\mu_{app} = m \left(\frac{\max(\dot{\gamma}, \dot{\gamma}_{min})}{\dot{\gamma}_{ref}} \right),$$

где m – коэффициент консистенции жидкости, n – индекс поведения потока, $\dot{\gamma}_{ref}$ обозначается эталонная скорость сдвига и $\dot{\gamma}_{min}$ является нижним пределом скорости сдвига.

Узел *Wall* включает в себя набор граничных условий, описывающих условия течения жидкости на неподвижных, движущихся и протекающих стенках.

Стенки фильеры являются сплошными. Отсутствие проскальзывания является граничным условием по умолчанию для моделирования сплошных стен. Нескользкая стенка – это стенка, в которой скорость жидкости относительно скорости стенки равна нулю. Для неподвижной стены это означает, что $u = 0$.

Узел *Outlet (выход)*. Это условие следует использовать на границах, для которых существует чистый отток из домена. Вход установлен как открытая граница с граничным напряжением 6 МПа. На выходе давление установлено равным 0 Па. Температура среды равна 293,15К (45°С). Также накладываем условие «подавить обратный поток».

Узел *Fluid (жидкость)* использует следующую версию уравнения теплопроводности для моделирования теплообмена в жидкостях:

$$\rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_p + Q_{vd};$$

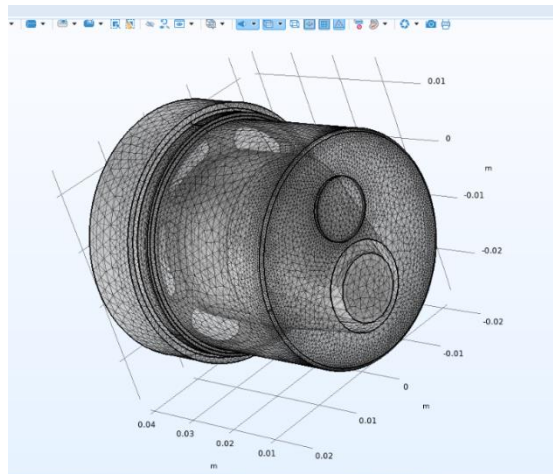
$$q = -k\nabla T;$$

$$\rho = \frac{P_A}{R_s T} \text{ в областях идеального газа,}$$

где ρ – плотность жидкости, c_p – теплоемкость жидкости при постоянном объеме, k – коэффициент теплопроводности жидкости, u – поле скорости жидкости, Q – источник тепла, p_A – абсолютное давление, R_s – газовая постоянная газа, T – температура.

Температура моделируемого вещества равна 293,15К (20°С).

Узел *Outflow (отток)* обеспечивает подходящее граничное условие для теплопередачи с преобладанием конвекции на выходных границах. В модели с конвективным переносом тепла это условие гласит, что единственный перенос тепла через границу происходит за счет конвекции. Градиент температуры в



нормальном направлении равен нулю, излучение отсутствует.

Для уравнения теплопередачи тепловой поток с коэффициентом теплопередачи, равным 50 Вт/(м²·К), и наружная температура 45 °С на всех наружных стенах фильеры. На входе установлена фиксированная температура 45°С, а на выходных границах применяются условия оттока.

Интерфейс Multiphysics объединяет две физики: *Creeping Flow (ползучий поток)* и *The Heat Transfer in Fluids (теплообмен в жидкостях)*.

Процесс численного решения инженерной или научной задачи методом конечных элементов подразумевает построение так называемой конечно-элементной сетки для разбиения геометрической модели на подобласти. Он является очень важным для получения решения и корректных результатов.

Сетка для фильеры построена (см. рисунок 3). Сетка соответствует геометрической модели геометрии компонента, что является результатом операций с геометрией в узле геометрии компонента.

Сетка работает так, что добавляя новый компонент в построитель моделей, последовательность создания сетки добавляется по умолчанию в узел сетки. Когда компонент имеет более одной последовательности создания сетки, они собираются в узле сетки.

Узел *Study* содержит все узлы, которые определяют, как решать модель.

Узел *Step: Stationary* (шага стационарного исследования) соответствует стационарному решателю (по умолчанию) или параметрическому решателю.

Узел *Solver Configurations* (Конфигурации решателя). Конфигурация решателя представлена узлом решения, в котором хранится как последовательность подузлов, определяющих способ вычисления решения, так и само решение – после того, как оно было вычислено.

Определены следующие параметры: скорости, температура и изотермические контура.

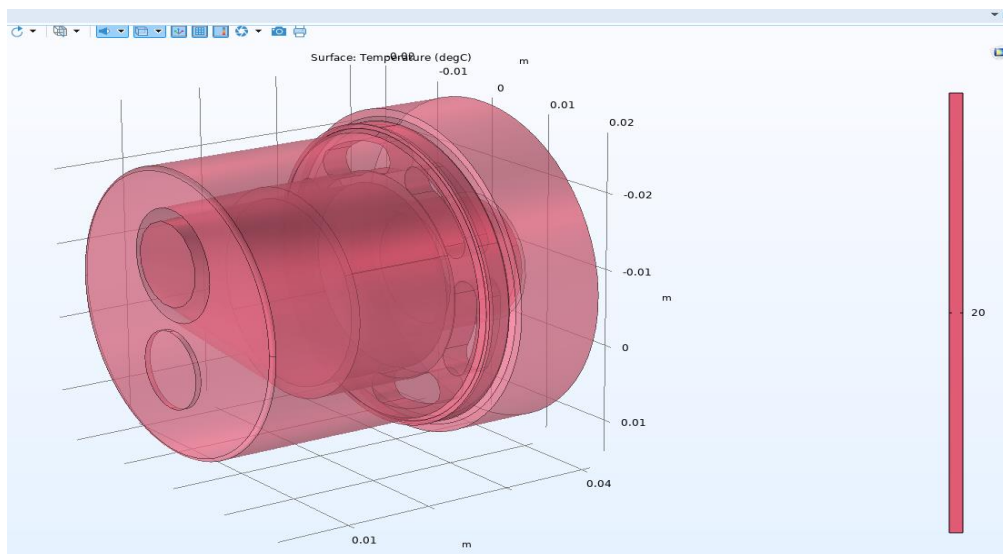


Рисунок 5 – График температур

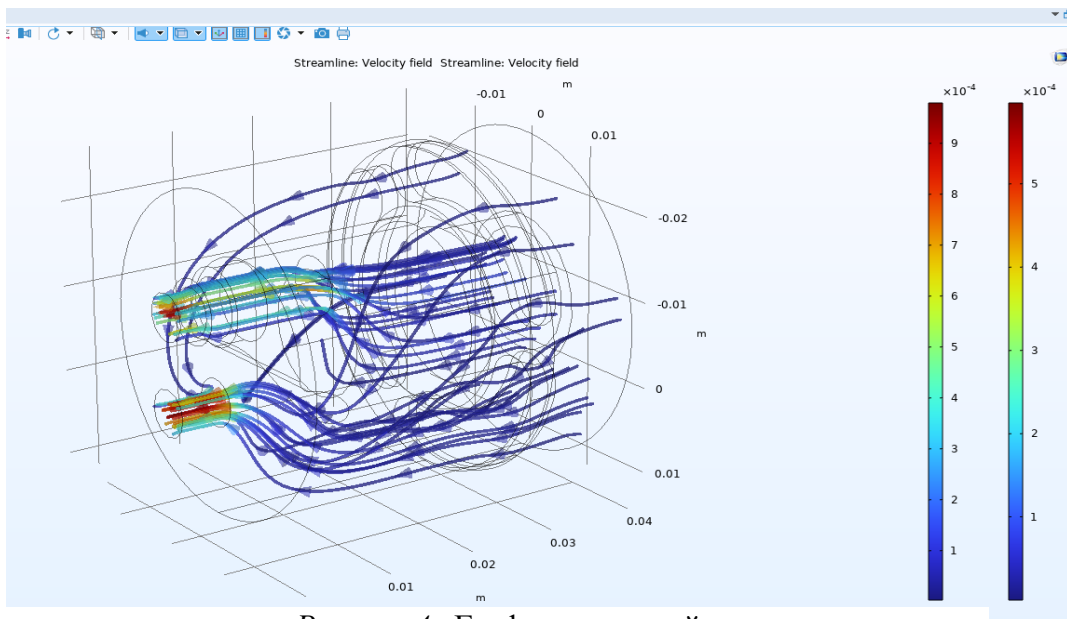


Рисунок 4 – График скоростей

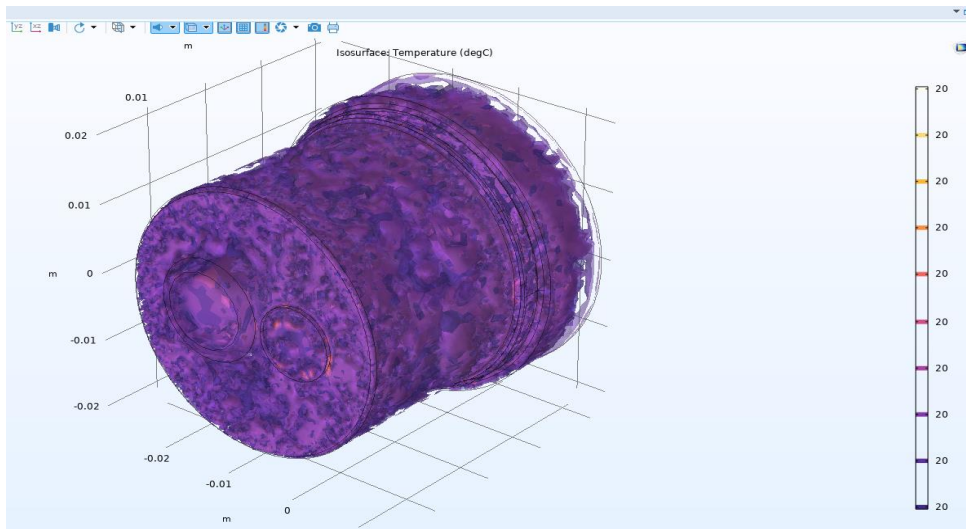


Рисунок 6. График изотермических контуров

Численное описание результатов по модели

Кондитерское изделие изготавливается массой $m = 18 \div 20$ (г). Из модели можно получить следующие данные: площади отверстий равны $\omega_1 = 9,1807 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ и $\omega_2 = 7,846 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, скорости потока на выходе из первого и второго отверстий равны соответственно $u_1 = 5,1889 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ и $u_2 = 4,2143 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. По формуле $Q = \omega \cdot u$ рассчитан расход $Q = 8,0126 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$.

Были определены следующие геометрические параметры изготовленного печенья: $h = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $d = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. На формирование одного печенья требуется $t = 3 \text{ с}$. По формуле $Q = \frac{\pi d^2 h}{4t}$ рассчитан натуральный расход $Q = 9,906 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Расход, посчитанный по модели, меньше натурального расхода. Отсюда следует, что необходимо скорректировать параметры. Было увеличено давление теста до 5 Мпа. Получена новая эпюра скоростей.

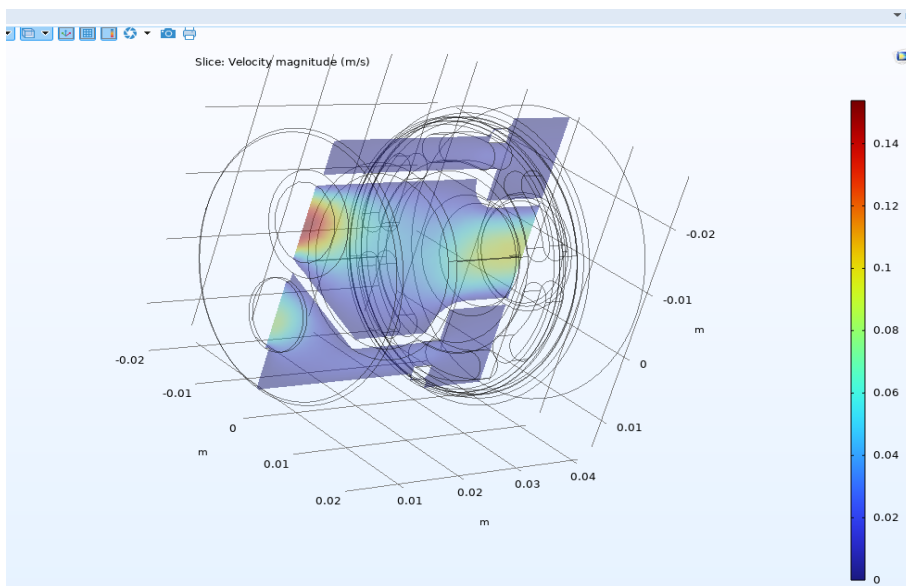


Рисунок 7 – Эпюра скоростей

Из эюры взяты средние скорости потока из первого и второго выходных отверстий, которые равны соответственно $u_1 = 0,1011 \text{ м/с}$ и $u_2 = 0,0514 \text{ м/с}$. Расход, определенный по полученным скоростям, равен $Q = 11,456 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Получена сходимость модели с натурой. Далее считаем, что модель соответствует действительности и ее можно использовать в качестве цифрового прототипа для производства кондитерских изделий.

Натурные эксперименты

Результаты, полученные после проектирования модели, применили для изготовления фильеры на 3D-принтере. Эту фильеру отправили на производство и протестировали для изготовления кондитерских изделий. Тестирование показало, что необходимо скорректировать определенные параметры. Необходимые параметры внесли в модель фильеры и получили точную деталь. Затем, набор фильер был изготовлен на 3D-принтере. И эту опытную партию отправили на производство, где она показала хороший результат.

Выводы

Определены необходимые размеры и формы, по которым изготовлена фильера для изготовления двухкомпонентных кондитерских изделий (см. рисунок 8).

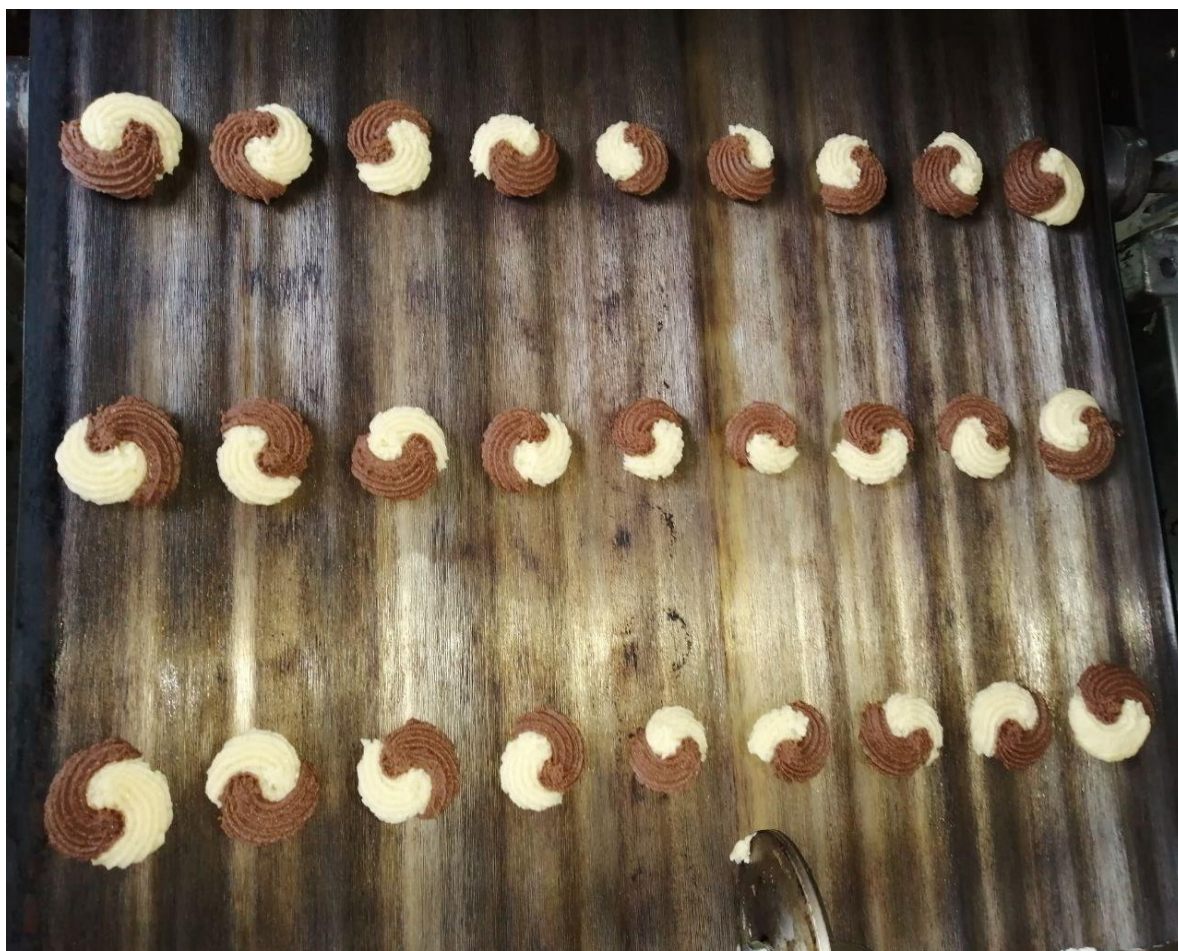


Рисунок 8 – Двухкомпонентные кондитерские изделия

Список цитированных источников

1. StudFiles [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net>. – Дата доступа: 08.05.2023.
2. Studme.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studme.org>. – Дата доступа: 08.05.2023.
3. Журнал «САПР и графика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru>. – Дата доступа: 08.05.2023 (Flow3d).
4. Молодой ученый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru>. – Дата доступа: 08.05.2023.

УДК 697.94

Кирикович Н. Ю., Максимчук Е. И.

Научный руководитель: Янчилин П. Ф., старший преподаватель

ПОДБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПРОМЫШЛЕННОМ КОНДИЦИОНЕРЕ В ХОЛОДНЫЙ И ТЕПЛЫЙ ПЕРИОДЫ ГОДА

При проектировании системы вентиляции бассейна в городе Бресте были приняты следующие параметры наружного воздуха (таблица 1) [2]:

Таблица 1 – Расчетные параметры наружного воздуха

Периоды года	Температура наружного воздуха $t_n, ^\circ\text{C}$;	Энтальпия наружного воздуха $I_n, \text{кДж/кг}$	Скорость ветра $V, \text{м/с}$
Теплый	27,2	51,0	2,9
Холодный	-21,0	-19,6	3,7

Расчетная температура внутреннего воздуха t_v для помещений плавательных бассейнов принимается в соответствии со СНиП 2.08.02-89* на 1–2 °С выше температуры поверхности воды в бассейне. При этом температуру поверхности воды в бассейне необходимо поддерживать на уровне 26–28 °С. Расчетная температура воды в ваннах крытых бассейнов для спортивного плавания принимается равной 26 °С. Нормируемая температура воздуха в бассейнах - 27–28 °С (принимаем 27 °С).

Нормируемая относительная влажность внутреннего воздуха (φ_v) в помещениях плавательных бассейнов принимается в соответствии со СНиП 2.08.02-89* равной 50–65 % (в теплый период года принимаем 65 %, в холодный -50 %).

Согласно расчёту в зале бассейна был принят следующий воздухообмен, учитывающий ассимиляцию вредных веществ расчётного помещения: $L = 11020 \text{ кг/ч}$. С целью обеспечения расчётного воздухообмена с поддержанием принятых расчётных параметров была запроектирована система вентиляции, в состав которой входит: приточно-вытяжная установка; система воздуховодов; приточные воздухораспределители типа АНС; вытяжные решетки 4АПН 600х600.

Подача воздуха в проектируемое здание осуществляется приточно-вытяжной установкой с механическим побуждением, расположенной на улице в теплоизолированном корпусе.