



*С.С. Козлов, Н.С. Григорьев,
А.С. Степанов, В.Ф. Булавин,
В.В. Яхричев
Вологодский
государственный
университет*

ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО КОНВЕЙЕРА СРЕДСТВАМИ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

В статье изложена методика автоматизированного проектирования многосекционных охлаждающих туннельных установок для предприятий пищевой промышленности с непрерывной конвейерной подачей продукции. Создание конструктивных 3D-моделей установки проведено средствами программного комплекса SolidWorks и Компас-3D. Для созданной конструкции охлаждающей туннельной установки с помощью модуля SolidWorks Flow Simulation смоделированы тепловые потоки и решена задача рационального размещения блоков охлаждения с испарителями и вентиляторами для равномерного распределения температурных полей и потоков воздуха по занятому продукцией объему. Определены необходимые скоростные характеристики работы конвейера для обеспечения заданных параметров охлаждения кондитерской продукции на примере зефира.

Автоматизированное проектирование в машиностроении, охлаждающие конвейеры, расчеты в SolidWorks Flow Simulation, моделирование температурных полей.

Задача автоматизации процессов разработки современного технологического оборудования для предприятий пищевой промышленности в условиях импортозамещения становится все более актуальной. Для получения качественных конструктивных решений необходимо использовать современные программные средства автоматизированного проектирования и инженерного анализа. При проектировании многосекционных ленточных туннельных конвейерных установок для получения качественного охлаждения, сохранения глянца на поверхности и вкусовых ощущений кондитерского продукта (зефира) важно обеспечить высокую точность поддержания заданных температурных полей по всему объему охлаждаемых изделий и скоростных характеристик движения ленты.

Создание конструктивных 3D-моделей линии охлаждения кондитерских изделий, состоящей из натяжной и приводной секций, пяти секций охлаждения, ленточного конвейера, осуществлялось средствами программного комплекса SolidWorks и Компас-3D (рис. 1).

Общая длина линии составляет 14,332 м. Длина одной секции охлаждения 2,5 м. Каждая секция охлаждения представляет собой вытянутый шкаф с габаритами 2,5×1,6×0,9 метра, двумя встроенными блоками охлаждения. Блок охлаждения приведен на рисунке 2. Каждый блок включает в себя испаритель (радиатор), по которому циркулирует Хладон, и 3 вентилятора. Каждая секция оснащена одним хладоагрегатом и двумя испарителями с блоками вентиляторов.

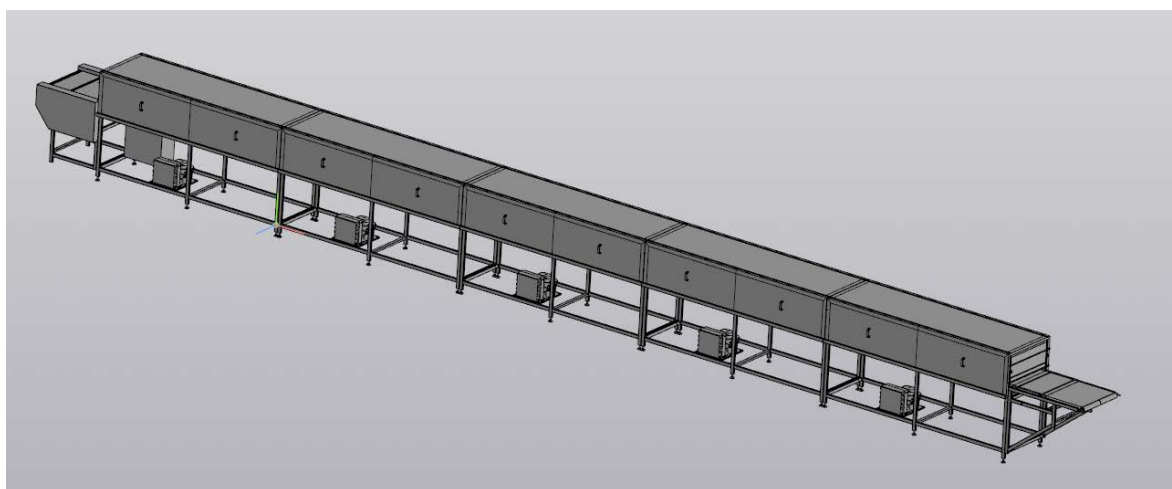


Рис. 1. 3D-модель пятисекционной линии охлаждения

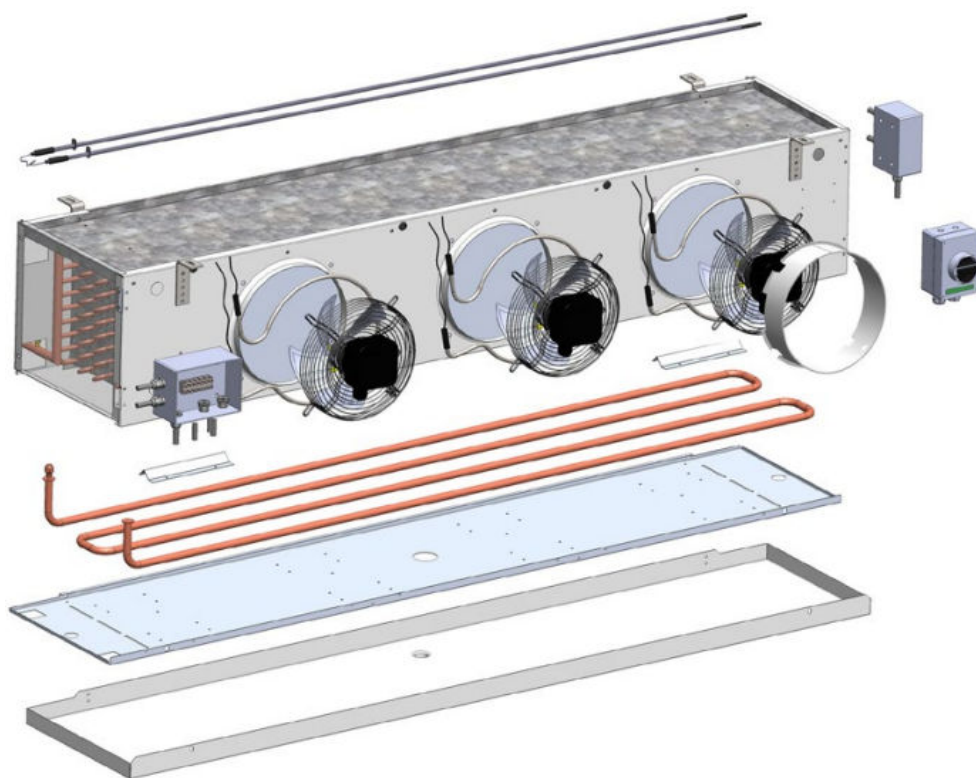


Рис. 2. Блок охлаждения

С помощью модуля SolidWorks Flow Simulation смоделируем тепловые потоки для решения задачи рационального размещения блоков охлаждения с испарителями и вентиляторами для равномерного распределения температурных полей и потоков воздуха по заданному объему продукции. Используемый модуль SolidWorks Flow Simulation предназначен для анализа сплошных сред в задачах динамики, теплообмена, построения полей течения жидкостей и газов на основе метода конечных элементов.

Анализ проводился в рамках одной секции охлаждения, поскольку все 5 секций охлаждения идентичны друг другу и происходящие в них процессы идентичны. Воздушный вентилятор охлаждения, посредством специального программного блока для анализа потоков воздуха, расчета температурного режима и систем климат-контроля, интегрированного в модуль SolidWorks Flow Simulation, заменен эквивалентной плоскостью и имитирует его работу. Подробности расчета вентилятора изложены в [1].

Процесс охлаждения осуществляется по следующему циклу. На конвейерную ленту выкладываются продукты охлаждения, в нашем случае продуктом охлаждения выступает зефир. Конвейерная лента транспортирует продукты через 5 секций охлаждения, в которых температура тел должна снизиться с 40 до 5 °С. Охлаждение происходит посредством обдува тел охлажденным воздухом, который циркулирует в камере по следующему принципу:

1. Воздух движется в зону пониженного давления, создаваемую вентиляторами позади испарителя (радиатора).

2. Воздух проходит сквозь радиатор, имеющий температуру приблизительно 3 °С и производится его охлаждение.

3. Охлажденный воздух «выбрасывается» вентиляторами в рабочую область секции охлаждения, где происходит теплообмен воздуха и тел охлаждения, понижая тем самым температуру последних.

4. Нагретый телами воздух начинает подниматься вверх и возвращаться к области пониженного давления, уходя на повторный цикл.

Расчет и моделирование процесса охлаждения продукции производится в SolidWorks Flow Simulation [2, 3]. Из расчетной схемы сборки исключены приводная и натяжная секции конвейера, а также четыре из пяти охлаждения. Часть конвейерной ленты, выступающая за пределы предполагаемой расчетной области, обрезана. Для обеспечения удобной работы с внутренней частью секции охлаждения боковые дверцы визуально скрыты, позволяя тем самым наблюдать и работать с внутренней частью секции, не исключая при этом твердые тела из расчета. В качестве охлаждающих элементов выступают модели двух блоков охлаждения, размещенных над конвейерной лентой в секции.

Задание граничных условий

Для оптимизации машинного времени расчетов была определена объемная область, на 4–5 % превышающая габариты камеры охлаждения и имеющая размеры 2,6×1,8×1,1 м (рис. 3). Для создания самого расчета применялся инструмент «Мастер проекта», позволяющий задать начальные параметры. В ходе использования данного инструмента были заданы следующие параметры:

1. Тип задачи – внешняя.
2. Используемые физические модели:
 - a. Теплопроводность в твердых телах;
 - b. Нестационарность;

- c. Общее время задачи – 23 с;
 - d. Временной шаг выдачи результатов – 0,5 с;
 - e. Гравитация – $-9,81 \text{ м/с}^2$ по оси Y.
3. Текучая среда – Air (газы).
 4. Материал по умолчанию – Stainless Steel 302 (Российский аналог – 12Х18Н9).
 5. Параметр шероховатости – 12,5 Ra.
 6. Давление – 101325 Па.
 7. Температура окружающего воздуха – 18 °С.
 8. Начальная температура твердых тел – 18 °С.

Охлаждаемая продукция представлена моделями прямоугольной формы, с габаритами 20×20×100 мм, равномерно распределенные массивом по всей длине конвейерной ленты в количестве 24 штуки.

В созданном проекте с помощью инструментов «Материалы», «Граничные условия», «Тепловые источники» и «Начальные условия» задаются параметры, оказывающие значительное влияние на адекватность модели термодинамического процесса.

В разделе «Материалы» конвейерной ленте присвоен материал – полиуретан, также создан пользовательский материал в качестве продукта охлаждения – зефира. Параметры продуктов охлаждения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики материала «Зефир»

Наименование параметра	Значение
Плотность	470 кг/м ³
Удельная теплоемкость	2930 Дж/(кг·К)
Тип проводимости	Изотропная
Коэффициент теплопроводности	0,35 Вт/(м·К)
Электропроводность	Диэлектрик
Радиационные свойства	нет

В разделе «Граничные условия» поверхностям, имитирующим работу вентиляторов, заданы: условия объемного расхода на входе, составляющие 118 м³/ч, температура воздушного потока на выходе составляет 3 °С. Для тел, имитирующих охлаждаемые тела, соз-

дан параметр реальной стенки, включающий в себя следующие параметры:

1. Температура стенки – 40 °С.
2. Коэффициент теплоотдачи стенки – 15,6 Вт/(м²·К) [1].
3. Температура текучей среды – 3 °С.
4. Шероховатость – 12,5 Ra.

Готовая модель с расположением охлаждаемых тел, блоков вентиляторов и расчетной областью показана на рисунке 3.

Задание целей расчета

Во вкладке «Цели» необходимо задать ряд анализируемых нами параметров, которые среда SolidWorks Flow будет обчитывать. В расчет установлены следующие цели:

Глобальные:

1. Температура текучей среды.
2. Полная температура.
3. Температура стенки.
4. Плотность теплового потока.
5. Конвективный тепловой поток.
6. Температура твердого тела.

Объемные:

1. Температура твердого тела.

Расчеты и предварительный анализ в SolidWorks Flow Simulation проводился для интервала в 23 физических секунды с шагом 0,5 секунду.

Первый интересующий нас параметр в данном расчете – это объемный параметр температуры. В подразделе «Объемные параметры» была рассмотрена таблица, представляющая эволюцию температуры во времени. Для наглядности данные представлены в виде графика на рисунке 4.

Расчет на малом интервале времени показал функцию охлаждения, близкую к линейной. За 23 секунды тела охладились в среднем до температуры 38,11 °С. В среднем за 1 физическую секунду тела охлаждаются на 0,09 °С.

Другим важным моментом является рациональное размещение блоков охлаждения в секции для обеспечения равномерности воздушных потоков. Визуализация результатов расчета представлена на рисунке 5.

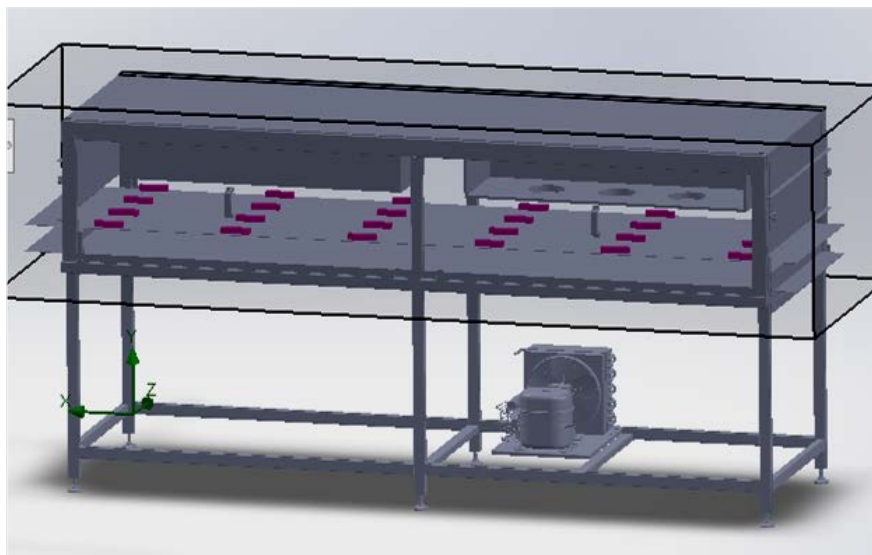


Рис. 3. Модель для расчета

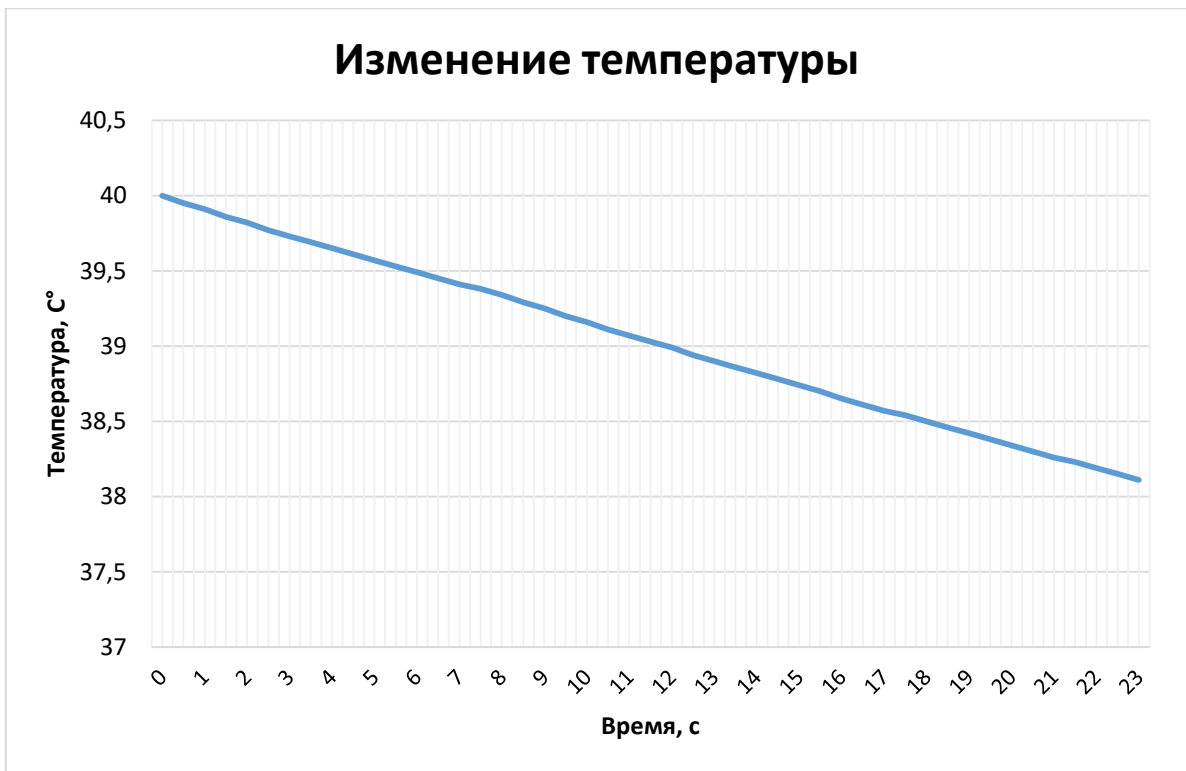


Рис. 4. Зависимость температуры от времени

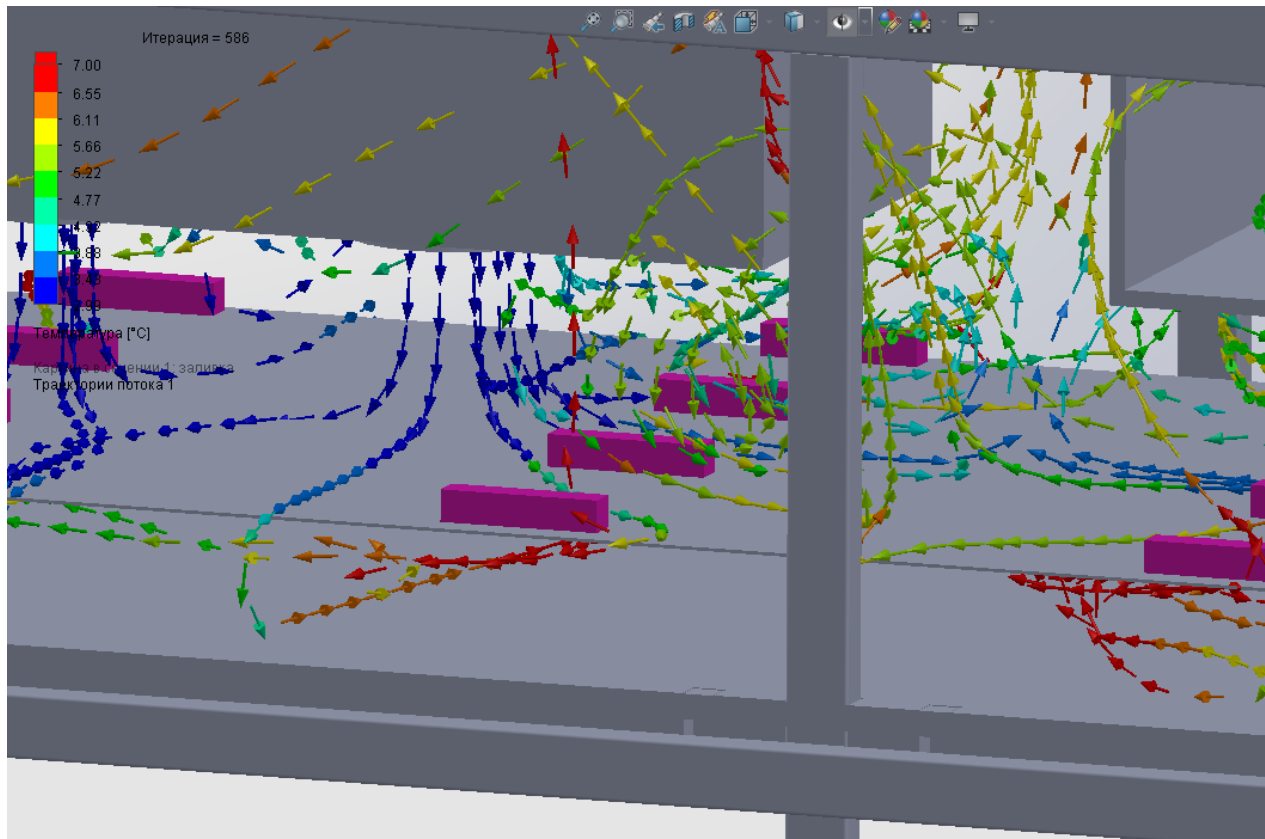


Рис. 5. Распределение воздушных потоков в секции охлаждения

Расчет по закону Ньютона – Рихмана

Исходные данные		Обозначения	Значения	Ед. изм.
1	Коэффициент теплоотдачи на границе поверхность тела – среда	$\alpha=$	15,6	Вт/(м ² ·К)
2	Температура окружающей среды (const)	$t_c=$	3	°С
3	Температура тела начальная	$t_1=$	40	°С
4	Температура тела конечная	$t_2=$	38	°С
5	Коэффициент теплопроводности тела	$\lambda=$	0,35	Вт/(м·К)
6	Коэффициент температуропроводности тела	$a=$	103600	м ² /с
7	Плотность тела	$\rho=$	470	кг/м ³
8	Удельная теплоемкость тела	$c=$	2930	Дж/(кг·К)
9	Форма тела	Параллелепипед		
10	Размеры тела	$H=$	0,02	м
11		$L=$	0,1	м
12		$B=$	0,02	м
Результаты расчетов		Обозначения	Значения	Ед.изм.
13	Площадь поверхности тела	$F=$	0,0088	м ²
14	Объем тела	$V=$	0,00004	м ³
15	Масса тела	$G=$	0,0188	кг
16	Площадь формы тела с учетом поправочного коэффициента	$K=$	0,01987	м ²
17	Темп нагрева (охлаждения) однородного тела при $\alpha \rightarrow \infty$	$m_\infty=$	5215000000	1/с
18	Модифицированное число Био	$Bi=$	0,1948	-
19	Отношение среднего температурного напора по поверхности к среднему температурному напору по объему	$\Psi=$	0,8709	-
20	Относительный темп нагрева (охлаждения)	$M=$	01697	-
21	Расчетный темп нагрева (охлаждения) однородного тела	$m_{a\lambda}=$	884700000	1/с
22		$m_{cp}=$	0,00217	
23		$\Delta=$	4076000000000	
24	Время нагрева (охлаждения) без учета формы тела по закону охлаждения Ньютона – Рихмана	$t_N=$	22,3	с
			0,3716	мин.
			0,006194	ч
			0,0002581	сут.

Давление внутри охлаждающей секции составило в среднем 101338 Па (нормальное атмосферное давление 101325 Па), а скорость потоков не превысила 0,5 м/с, что исключило риски «сдувания» продуктов охлаждения с рабочей поверхности конвейера.

Для проверки адекватности построенной модели воспользуемся сравнительным методом. В качестве альтернативы будем применять алгоритм, предполагающий проведение расчета по формулам классической термодинамики, основанный на законе Ньютона – Рихмана и на теоретических и практических исследованиях советских ученых Г.М. Кондратьева и М.А. Михеева [4, 5]. Расчеты выполнены с помощью EXEL и их результаты

представлены в таблице 2. Исходные данные для расчета соответствуют данным анализа в SolidWorks Flow Simulation за исключением того, что в данном расчете итоговая температура является исходным параметром, а время – вычисляемым. Т.к. нам известна температура тела за период охлаждения в 23 секунды и известна тенденция к охлаждению, мы можем сравнить расхождение по времени.

Нам известно, что за 23 секунды тело охлаждается до 38 °С. По данным расчета методом Ньютона – Рихмана время составляет 22,3 секунды.

Расхождение результатов составило 0,7 секунды или 3 %, что в рамках допустимой погрешности. Из

чего можно заключить, что составленная модель адекватна и наглядно представляет процесс охлаждения.

Согласно исходным параметрам, температура нагреваемых тел на входе составляет 40 °С, а на выходе должна составлять 5 °С. Длина рабочей части охлаждающего конвейера составляет 12,5 м. За одну секунду тело охлаждается на 0,09 °С, следовательно охлаждение с 40 до 5 °С займет $35/0,09 = 388,8$ с. Из этого выходит, что рекомендуемая скорость движения конвейерной ленты составляет $12,5/388,8 = 0,032$ м/с.

Из полученных данных определим расчетную производительность. В рассмотренном случае тела расположены по 4 в ряд с расстоянием в 350 мм между рядами. По найденной скорости движения конвейера вычислим время, за которое один ряд пройдет расстояние в 350 мм: $0,35/0,032 = 10,9$ с. За 60 секунд 5,5 рядов выйдут из установки охлажденными. За час – 330 рядов. Зная, что в ряду 4 тела, получим охлажденными 1320 единиц продукции. Поскольку нам известна масса одного из них (0,04 кг), следует, что производительность этой установки – 52,8 кг/ч. Для увеличения производительности следует укладывать продукцию более плотно.

Литература

1. Кудрин, Н. А. Оптимизация конструкции крыльчатки вентилятора в соответствии с требова-

ниями производительности / Н. А. Кудрин, Н. С. Григорьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 4 (14). – С. 50–53.

2. Анализ внешнего потока в SolidWorks Flow Simulation – Блог компании DassaultSystèmes. Анализ и проектирование CAD/CAM систем. – URL: habr.com/ru/company/ds/blog/565708/ (дата обращения: 03.11.2022). – Текст : электронный.

3. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК-Пресс, 2015. – 562 с.

4. Бормасов, Н. А. Исследование процессов теплообмена при изготовлении объектов с гуммированным покрытием / Н. А. Бормасов, А. Ю. Белянина, Т. А. Кочкорева // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 2 (16). – С. 51–56.

5. Стоянов, Н. И. Теоретические основы теплотехники: техническая термодинамика и теплообмен : учебное пособие / Н. И. Стоянов, С. С. Смирнов, А. В. Смирнова ; Северо-Кавказский федеральный университет. – Ставрополь : Северо-Кавказский Федеральный университет (СКФУ), 2014. – 225 с. – URL: biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457750 (дата обращения: 02.11.2022). – Текст : электронный.

*S.S. Kozlov, S.N. Grigoriev, A.S. Stepanov, V.F. Bulavin, V.V.Yakhrichev
Vologda State University*

DESIGN SIMULATION OF COOLING TUNNEL CONVEYOR OPERATION BY MEANS OF SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

The article describes the methodology of computer-aided design of multi-section cooling tunnel installations for food industry enterprises with continuous conveyor feeding of products. The creation of 3D structural models of the installation was carried out by means of the SolidWorks and Compass 3D software package. For the created design of the cooling tunnel installation, heat flows were modeled using the SolidWorks Flow Simulation module and the problem of rational placement of cooling units with evaporators and fans for uniform distribution of temperature fields and air flows over the volume occupied by products was solved. The necessary speed characteristics of the conveyor operation are determined to ensure the specified parameters of cooling confectionery products on the example of marshmallows.

Computer-aided design in mechanical engineering, cooling conveyors, calculations in SolidWorks Flow Simulation, modeling of temperature fields.