

УДК 621.865.8:664

Моделирование и изготовление мягкого схвата с пневматическим приводом

Соснин Марк Дмитриевич

Романенко Богдан Владимирович

Воротников Сергей Анатольевич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрен процесс разработки мягкого схвата с пневматическим приводом. Проанализированы существующие решения мягких захватных устройств для применения в пищевой промышленности. Рассмотрен принцип работы, схожий с действием манометрических пружин. Произведена компьютерная симуляция работы системы управления в среде Festo FluidSIM и создана модель мягких элементов в среде Ansys. Изготовлен прототип и проведены его испытания.

Ключевые слова: мягкий хват, автоматизация, кондитерское производство, компьютерное моделирование, дельта-робот, система управления, пневматическая система

Введение. Актуальность темы проектирования и изготовления мягкого схвата с пневматическим приводом обусловлена современными тенденциями в области робототехники и автоматизации производственных процессов. Пищевая отрасль всегда активно развивается, однако слабым звеном до сих пор остается этап упаковки продукции [1].

В рамках данной статьи рассмотрен процесс изготовления прототипа мягкого схвата для следующего примера кондитерского производства, представленного на рис. 1: по конвейерной ленте движутся кондитерские изделия, их необходимо быстро и без повреждений размещать в коробки.

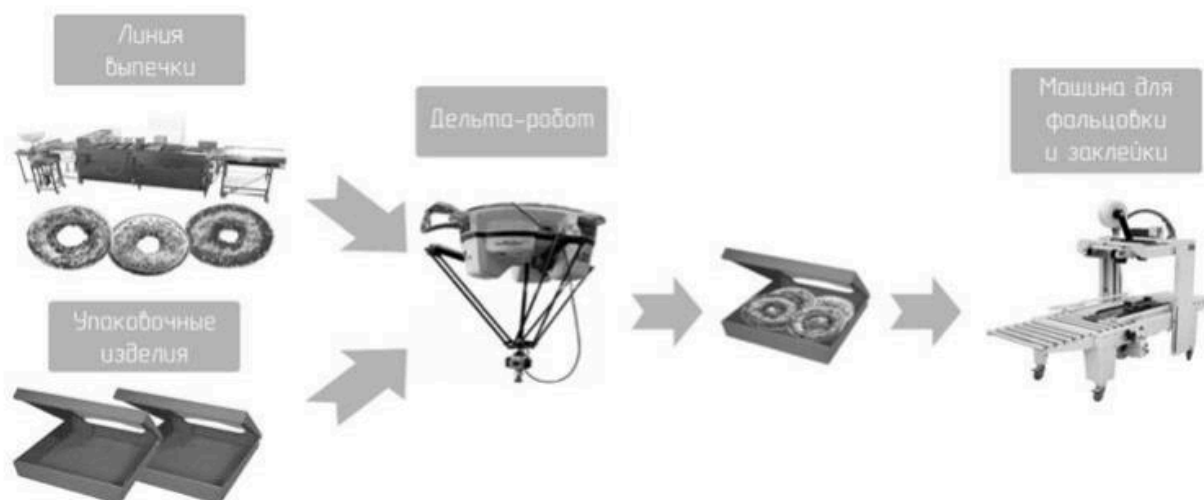


Рис. 1. Схема производства

Для этой задачи предполагается использование дельта-робота, обладающего высокой скоростью работы. Однако существующие жесткие захваты не всегда обеспечивают необходимую деликатность, благодаря чему все большее применение находят мягкие схваты (рис. 2) из-за своей способности безопасно захватывать хрупкие или легко деформируемые объекты, а также объекты нестандартной формы без необходимости точного позиционирования.

Предполагается, что использование пневматической системы в сочетании с мягкими захватными элементами позволит обеспечить надежную и контролируемую работу системы, что сделает такое решение удобным и экономически целесообразным для применения в производстве [2–5].



Рис. 2. Мягкий схват в кондитерском производстве

Существующие решения. В области мягких захватных устройств уже имеется ряд функциональных решений. Были выбраны и проанализированы три существующие модели, применимые по параметрам в данном примере кондитерского производства. Параметры моделей представлены в табл. 1.

В условиях кондитерского производства ключевыми критериями при сравнении захватных устройств являются их масса, а также способность надежно работать с продукцией различного размера [2]. Среди рассмотренных вариантов конструкция «SFG Soft Finger Gripper» (FNC3-N4062) компании Soft Robot Tech (рис. 3) была выбрана в качестве наилучшего варианта, поскольку допускает регулировку расстояния между мягкими захватными элементами, что повышает ее универсальность, например, при работе с кондитерскими изделиями разных размеров. Однако из-за относительно большой

массы устройства, его применение в составе дельта-робота приводит к необходимости снижения скорости работы с целью минимизации инерционных нагрузок и обеспечения стабильности работы системы [2].

Для схвата были сформулированы следующие основные технические требования:

- отсутствие деформаций и повреждений продукции при захвате;
- возможность работы с диапазоном габаритов захватываемых объектов;
- масса устройства не более 300 г;
- соответствие конструкции санитарным нормам, принятым в пищевой промышленности.

Таблица 1

Основные параметры мягких схватов различных компаний

Параметры	Vegetable Gripper Rochu [3]	SFG Soft Finger Gripper (FNC3-N4062) Soft Robot Tech [4]	Pneumatic Gripper SoftGripping [5]
Масса схвата, грамм	647	610	190
Габариты схвата (высота × диаметр), мм	82 × 115	87,5 × 200	90 × 72
Грузоподъемность, грамм	405	1740	450
Габариты захватываемого объекта, мм	0–141	22–175	5–120
Максимальное усилие, создаваемое одним мягким элементом, Н	4,5	8,3	5,0
Рабочее давление, бар	–0,3–1,2	–0,6–1,0	–0,3–1,0
Возможность регулировки расстояния между мягкими элементами	Отсутствует	Присутствует	Отсутствует



Рис. 3. Мягкий схват SFG Soft Finger Gripper (FNC3-N4062) компании Robot Tech

Принцип работы. Можно сказать, что подобные мягкие схваты по своему принципу работы крайне схожи с манометрическими приборами, внутри которых обычно устанавливается манометрическая пружина или же трубка Бурдона [6–9].

Такая пружина позволяет преобразовать изменение давления в механическое движение. При подаче давления внутреннее сечение деформируется, изгибая трубку. Одна из разновидностей таких трубок — разработанная инженером Нагаткиным А.Г. пружина, характеризующаяся особым сечением: внутренняя полость расположена эксцентрично относительно наружной оболочки [6]. Данная конструктивная особенность обуславливает отличия в принципе действия по сравнению со стандартными манометрическими пружинами. В отличие от трубки Бурдона, изменяющей кривизну за счет деформации поперечного сечения, пружина Нагаткина преимущественно разгибается под воздействием изгибающего момента, возникающего в поперечном сечении. Основываясь на принципе работы пружины Нагаткина, проектировались мягкие элементы схвата.

Компьютерное моделирование. Была спроектирована следующая модель системы управления (рис. 4, а): центральная пневматическая магистраль подключена к регулятору давления газа (Р.Д.Г.), с помощью которого задается рабочее давление для схвата. Далее посредством пружинно-возвратного нормально-закрытого пневматического распределителя с 5-ю присоединительными отверстиями и 2-мя состояниями (П.Р. 5/2 (НЗ)) осуществляется переключение рабочих состояний схвата. Управление переключением происходит микроконтроллером через электромагнитное реле. В среде Festo FluidSIM работу мягких элементов симулировали пневмоцилиндры (рис. 4, б).

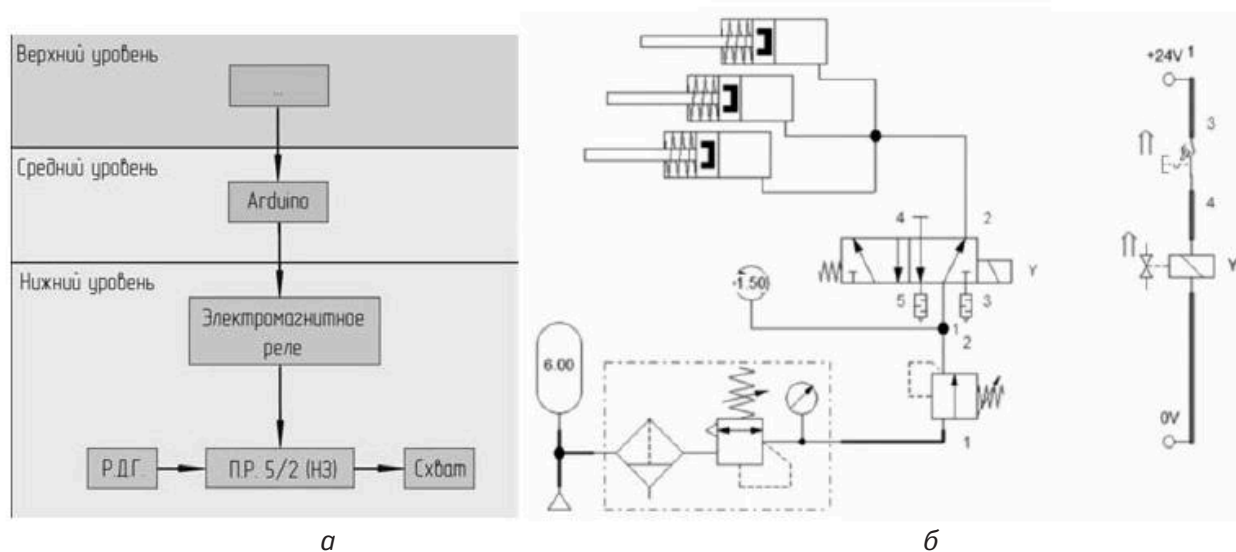


Рис. 4. Структура системы управления (а), модель системы управления в среде Festo FluidSIM (б)

Также в программной среде Ansys была разработана модель мягкого элемента захвата (рис. 5), которая позволяет проводить симуляцию работы

«пальца» и, на основе заданных параметров материала, определять предельное давление, угол сгибания и создаваемое усилие в зависимости от давления, а также другие механические характеристики.

Создание прототипа схвата. Для изготовления мягких элементов был выбран литьевой силикон Epoxu master с твердостью 40А по Шору (рис. 6, а), обладающий достаточной эластичностью, прочностью и безопасностью при контакте с пищевыми продуктами [5].

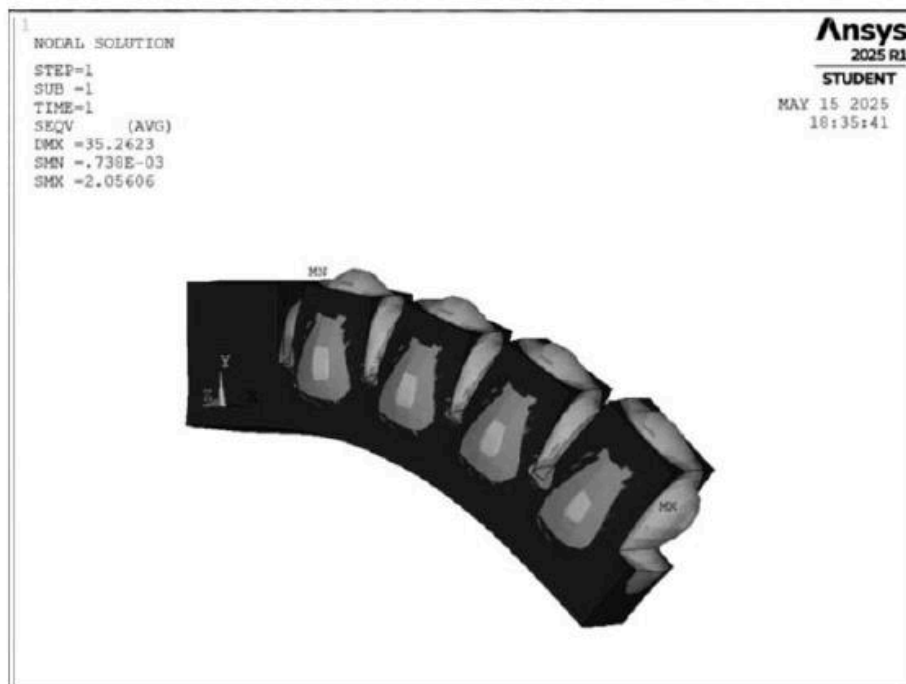


Рис. 5. Модель мягкого элемента в программной среде Ansys

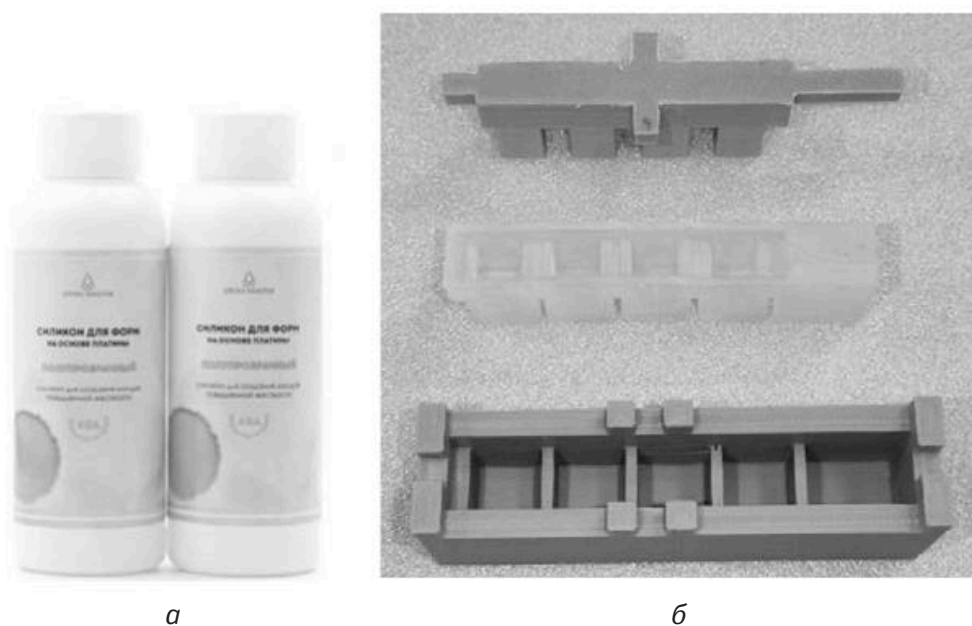
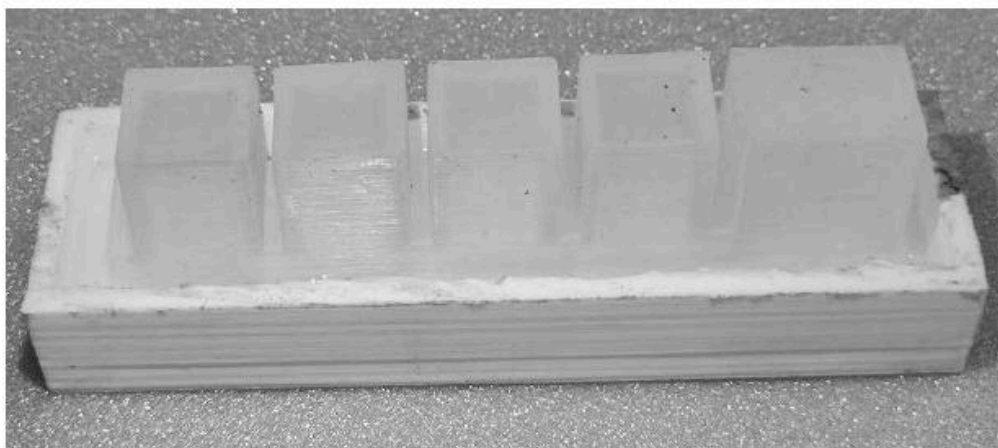
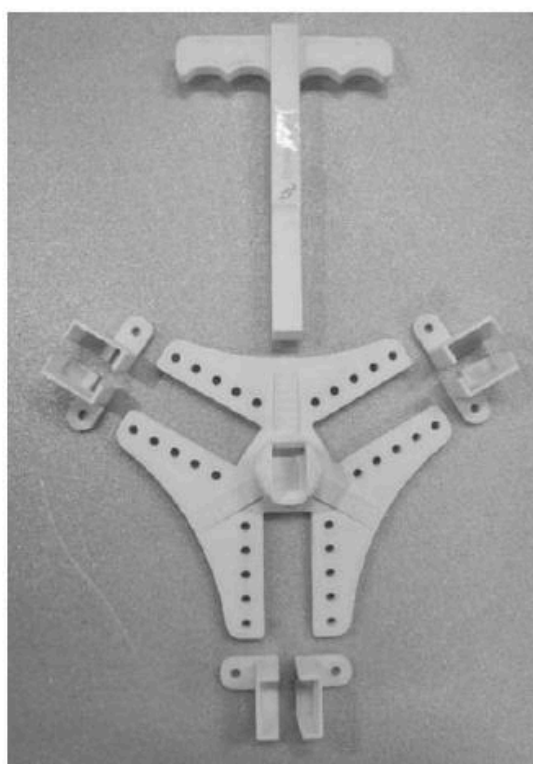


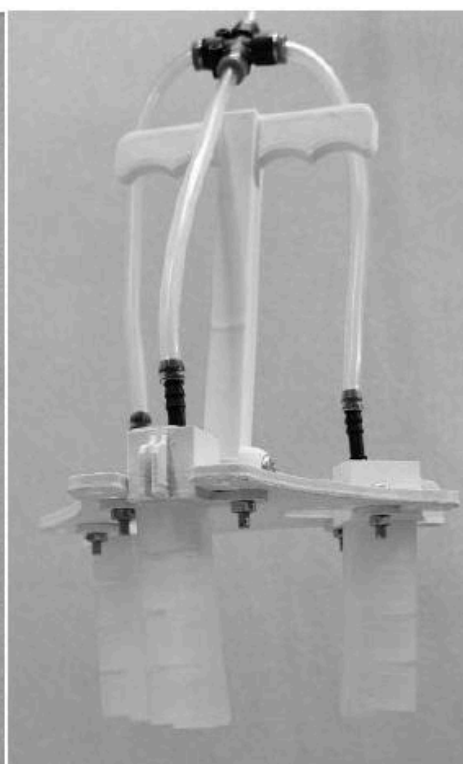
Рис. 6 (начало). Литьевой силикон Epoxu master (а), процесс изготовления полых части мягкого элемента (б)



в



г



д

Рис. 6 (окончание). Процесс изготовления дна мягкого элемента (в),
каркас схвата (г), мягкий схват в сборе (д)

Процесс изготовления состоит из следующих этапов:

- 1) печать литьевых форм;
- 2) смешивание компонентов силикона;
- 3) дегазация смеси для удаления пузырей;
- 4) заливка смеси в форму;
- 5) досрочное извлечение полый части мягкого элемента после затвердевания силикона, но не полной его полимеризации (рис. 6, б);
- 6) помещение полый части в «ванну» с новой смесью силикона аналогично п. 2–4 для создания дна мягкого элемента (рис. 6, в);

7) извлечение и обработка мягкого элемента после полимеризации силикона.

Для изготовления каркаса схвата был выбран ABS-пластик, так как он обладает высокой прочностью, легкостью и долговечностью. Далее был собран рабочий прототип схвата (рис. 6, з, д).

Проведение испытаний и анализ результатов. Изготовленный опытный образец был подвергнут испытаниям с целью оценки его соответствия предъявляемым требованиям. Масса собранного прототипа схвата составила 165 г.

Для проведения испытаний на оказываемое усилие одним мягким элементом, он закрепляется в специальный стенд, представленный на рис. 7, а. Весы выдают результат в граммах, для получения значения усилия:

$$F = mg,$$

где F — оказываемое усилие, Н; m — масса, кг (значение измерения с весов); g — ускорение свободного падения, $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Для проведения испытаний на угол сгибания мягкий элемент удерживается в положении, показанном на рис. 7, б, угол измеряется по крайней точке мягкого элемента с помощью транспортира.

Для проведения испытаний на грузоподъемность использовались стальные цилиндры различной массы. Удалось захватить и удерживать без выскальзывания цилиндр массой 905 г (рис 7, в).

Для проведения испытаний на минимальный захватываемый габарит использовались сверла различных диаметров из-за широкого диапазона размеров и стандартизованных диаметров. Удалось захватить и удерживать без выскальзывания сверло диаметром 6 мм (рис 7, г).

Для проведения испытания на максимальный захватываемый габарит использовались диски различных диаметров. Удалось захватить и удерживать без выскальзывания диск диаметром 140 мм (рис. 7, д).

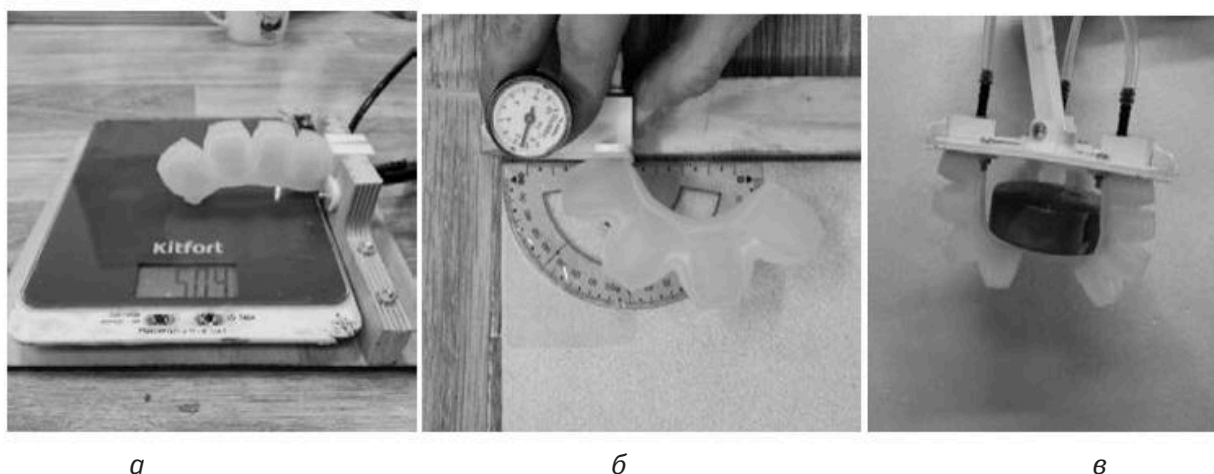


Рис. 7 (начало). Испытание на усилие, создаваемое одним мягким элементом (а), испытание на угол сгибания (б), испытание на грузоподъемность (в)

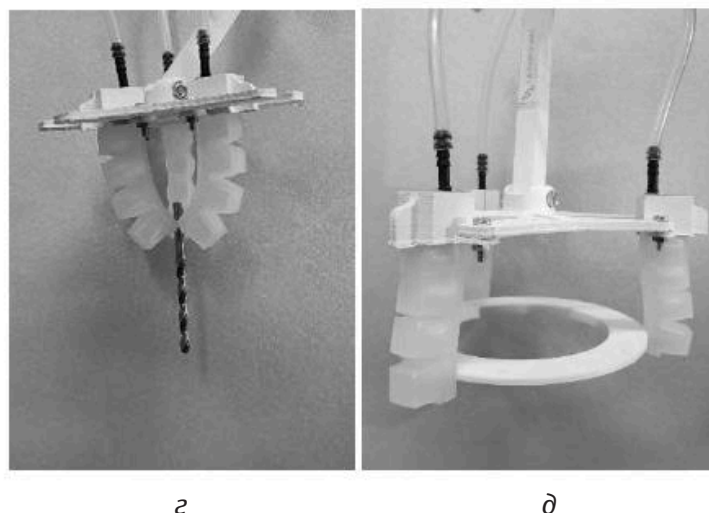


Рис. 7 (окончание). Испытание на минимальный захватываемый габарит (а), испытание на максимальный захватываемый габарит (б)

Результаты испытаний, представленные в таблице 2, показали, что параметры схвата полностью соответствуют требованиям задачи: он способен захватывать и перемещать объекты с различными габаритами, обеспечивая надежность при упаковке. Также масса схвата не окажет значительного влияния на динамические характеристики дельта-робота, позволяя поддерживать высокие рабочие скорости без риска возникновения избыточных инерционных нагрузок.

Таблица 2

Параметры схвата

Масса схвата, г	165
Габариты схвата (высота × диаметр), мм	86×178
Грузоподъемность, г	905
Габариты захватываемого объекта, мм	6–140
Рабочее усилие, создаваемые одним мягким элементом, Н	5
Рабочее давление, бар	1,0–1,5
Возможность регулировки	+

На основе полученных экспериментальных данных был построен график зависимости силы, создаваемой оказываемой одним мягким элементом, в зависимости от давления (рис. 8, а). Диапазон давления был разбит на три основных участка:

- зона малых деформаций, в которой форма пальца почти не меняется, и, соответственно, сила пренебрежимо мала;
- рабочая зона — область рабочего давления схвата;
- предельная зона, в которой мягкие элементы пребывают в максимальной близости к своим предельным прочностным характеристикам.

График силы в рабочей области был линеаризован, была найдена производная на этом участке — $\tan \alpha = 5,6$. С помощью этого была скорректирована модель пневматической системы в компьютерной среде Festo FluidSim для более точного анализа и дальнейшего улучшения: пневмоцилиндру была назначена сила сопротивления, равная линеаризованному участку рабочей зоны (рис 8, б). Модель позволяет визуализировать поведение системы, что позволяет предварительно оценить работу схвата без необходимости проведения большого количества физических испытаний.

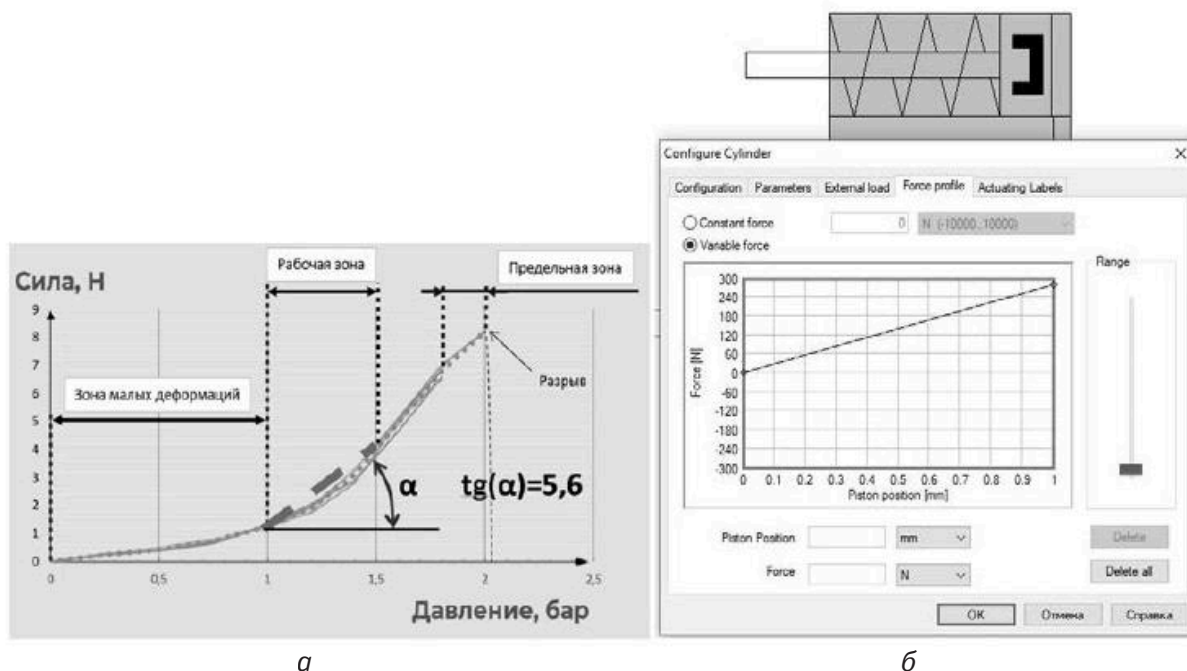


Рис. 8. Экспериментальный график зависимости силы от давления (а), уточнение параметров компьютерной модели пневматической системы (б)

Заключение. В ходе работы была разработана структура системы управления и ее компьютерная модель в среде Festo FluidSIM, симуляция поведения мягких элементов в среде Ansys. Был изготовлен прототип мягкого схвата и системы управления для работы с кондитерскими изделиями. Проведенные испытания подтвердили работоспособность конструкции в заданных габаритных пределах. По результатам испытаний была уточнена компьютерная модель системы в среде Festo FluidSIM, что позволяет предварительно оценить работу схвата без необходимости физических испытаний.

Среди преимуществ решения:

- отсутствие деформаций и повреждений продукции при захвате;
- возможность работы с широким диапазоном габаритов захватываемых объектов;
- достаточно малая масса конструкции, позволяющая дельта-роботу функционировать на высоких скоростях без потери стабильности;
- соответствие используемых материалов и конструкции санитарным требованиям, установленным для оборудования пищевой промышленности.

Основными ограничениями являются:

- отсутствие обратной связи о силе захвата;
- взаимодействие оператора напрямую с нижним уровнем — необходимость ручной перенастройки рабочего давления схвата и расстояния между мягкими элементами под разные типы продукции.

В дальнейшем планируется осуществить автоматическое регулирование расстояния между мягкими элементами в зависимости от типа захватываемых объектов, а также интегрировать систему обратной связи для контроля точности и корректности работы устройства.

Литература

- [1] Lightstead A. Automation in the Food Packaging Industry — Trends and Benefits. URL: <https://www.pwrpack.com/pwr-insights/food-packaging-automation/> (accessed 02.11.2024).
- [2] Zhe Q., Hannibal P., Zhongkui W., Shinichi H., Sadao K. An Evaluation System of Robotic End-Effectors for Food Handling. MDPI Journal, 2023, vol. 2 (22), art. no. 4062. <https://doi.org/10.3390/foods12224062>
- [3] Rochu Soft Gripper. URL: https://asenc.co.th/gripper/soft_gripper.pdf (accessed 02.11.2024).
- [4] SRT Soft Robot Tech Co. URL: <https://www.softrobottech.com/web/en/product/253> (accessed 02.11.2024).
- [5] SoftGripping. URL: <https://soft-gripping.com> (accessed 26.02.2025).
- [6] Андреева Л.Е. *Упругие элементы приборов*. Москва, Машгиз, 1962, 456 с.
- [7] Yi-Qi L., Zhi-Wei W., Chang-Ying H. Progress in research on the safety of silicone rubber products in food processing. Comprehensive Reviews in Food Science and Food, 2023, vol. 2 (4), pp. 2887–2909. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13165>
- [8] Крейнин Г.В., Кривц И.Л., Винницкий Е.Я., Ивлев В.И. *Гидравлические и пневматические приводы промышленных роботов и автоматических манипуляторов*. Москва, Машиностроение, 1993, 299 с.
- [9] Воротников С.А. *Информационные устройства робототехнических систем*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 382 с.

Modeling and manufacturing of a soft gripper with pneumatic drive

Sosnin Mark Dmitrievich

Romanenko Bogdan Vladimirovich

Vorotnikov Sergey Anatolievich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

This research explores the the development process of a soft gripper actuated by a pneumatic drive. Existing solutions for soft gripping systems applicable to the food industry are analyzed. The operating principle, based on the behavior of manometric springs, is examined. A computer simulation of the control system was carried out using Festo FluidSIM, and a model of the soft elements was created in Ansys. A prototype was fabricated and subjected to experimental testing.

Keywords: soft gripper, automation, confectionery production, computer simulation, delta robot, control system, pneumatic system