

«Мой личный опыт повышения операционной эффективности»

Никита Долгополов

С августа 2021 года я обучаюсь в Корнельском Университете (Cornell University) в США по программе Mechanical and Aerospace Engineering. Мой университет является крупным научным центром и имеет множество лабораторий и инженерных проектов, в которых я работал начиная с первого семестра. Преимущественно из них я черпаю свой опыт повышения операционной эффективности, а потому следует для начала изложить контекст деятельности каждой из команд.

С июня по декабрь 2022 года я работал над проектом 3D-печати бетонных конструкций с помощью модифицированного робота-руки компании ABB. Проект принадлежит исследовательской лаборатории Nair Research Group, которая работает над цементными материалами и другими разработками в этой сфере. Моей основной задачей, как студента-первокурсника, была разработка нового состава бетона и экспериментальное тестирование разной комбинации ингредиентов специально для использования в 3D-принтере, которые должны иметь низкую текучесть и быстрое затвердевание, помимо других характеристик. Самый яркий пример повышения операционной эффективности, связанный с данным проектом - использование концепта jit (Just-in-Time) при подаче бетона для робота: насос использовался для подачи бетона по руке робота в голову экструдера, бетон перемешивался в маленьком миксере с этим установленным насосом, а маленький миксер наполнялся из большого миксера по надобности. Эффективность этого подхода заключается в том, что перемешивание бетона в крупном объеме с помощью крупного миксера гораздо более качественное, чем с использованием маленького миксера и использование такой “производственной линии” позволило повысить качество бетона и поддерживать достаточное количество материала перед насосом без переполнения маленького миксера. Зная скорость печати, мы регулировали объем подготавливаемого материала, избегая простоев и сохраняя стабильный поток материалов для состава, то есть песка, цемента, воды, микрокремнезема и летучей золы. Это снизило нагрузку на членов команды и позволило распределить наши усилия на повышение качества и снижение требуемого количества человек на станции.

Мой следующий опыт повышения операционной эффективности связан с моей работой в лаборатории Cornell Space Structures (CSS) над проектом Развертываемых Композитных Конструкций, где передо мной стояла задача разработать метод соединения частей конструкции: дизайн самого соединения и производственный процесс. Структура и соединение должны быть очень компактными и складываемыми, поэтому я предложил модифицировать геометрию DCB (Deployable Composite Boom) путём лазерной резки и склейки для создания двух частей застёжки соединения перед отверждением композитов в печи. Производственный процесс был в значительной степени унаследован из Калифорнийского Технологического Института (Caltech) и был модифицирован для улучшения производства моих деталей. Использование такой модифицированной производственной технологии было одним из ключевых решений, которое значительно ускорило изготовление деталей, а технология также применима как к углеродному волокну, так и к более дешевому стекловолокну, которое использовалось для тестирования.

Для понимания произведенных улучшений следует описать сам процесс: силиконовая форма и её части производятся с использованием стандартизированного металлического контейнера и формы, напечатанной методом полимерной печати (что придает ей высокую гладкость поверхности), композитное полотно достается из холодильника, нарезается на нужные размеры и складывается между слоями формы внутри алюминиевого контейнера, после чего вся форма загружается в печь и опекается по специальному температурному графику - повышение температуры заставляет силикон расширяться внутри контейнера, что ведет к повышению внутреннего давления до нескольких атмосфер и созданию благоприятной среды для затвердевания клейкого элемента и фиксации формы композитного волокна. Во время тестирования процесса я обнаружил две основные проблемы: высокое трение на стенках металлического контейнера приводило к изнашиванию и повреждениям

силиконовой формы, что требовало ее замены после процесса изготовления; также, изготовление нескольких компонентов для формы требовало создание нескольких напечатанных пластиковых форм. Для решения первой проблемы я применил техническую смазку, которая также предотвратила прилипание силикона к металлическим стенкам. Для решения второй проблемы, в дизайн напечатанной формы были включены вырезы, как на правом верхнем изображении второго рисунка в приложении, которые позволили использовать одну и ту же напечатанную форму (master mold) для создания всех элементов силиконовой формы, изложенных справа снизу. Можно обратить внимание на поврежденные края силиконовых элементов - это результат увеличения силикона в объеме из-за повышения температуры и просачивания силикона в стыки металлического контейнера и для крупных деталей этой дефект незначителен. Таким образом, модификация главной формы позволила избежать дополнительных трат лаборатории на производство форм, а модификация производственного процесса позволила сократить трату материалов на создание силиконовых форм. В новом процессе я создал возможность использовать силиконовые формы пять раз вместо двух. Более подробный технический отчет по проекту на английском языке можно найти в моем онлайн-портфолио в секции “Техническая Документация и Исследовательские Работы”.

Летом 2024 года я присоединился к компании Tesla Inc. в роли Инженера-Механика и работал над улучшением end-of-line тестера системы охлаждения индустриального аккумуляторного юнита Megarack 2XL, который используется для финального тестирования жидкостной системы охлаждения после сборки перед установкой в Megarack 2XL. Моей главной задачей было снижение количества неполадок и ложных отрицательных показаний во время тестов системы охлаждения. Тестер своим видом очень похож на высокую кабинку в которую заезжает тележка с UUT (Unit Under Test) - системой охлаждения для установки, которая подключается к самому тестеру через жидкостные каналы и электрические соединения. Тест длится порядка 20 минут, и ошибки при подключении системы UUT могут спровоцировать значительную задержку на линии. Основные причины неполадок тестера были следующие: неправильное подключение жидкостных каналов тестера к UUT, неправильное подключение жгутов проводов, поломки коннекторов проводов из-за наезжания тележки с системой охлаждения (UUT) на них, длительное время подключения каналов и сложность этой задачи из-за устройства их коннекторов, а также утечки и потеря давления на интерфейсах деталей жидкостных коннекторов. Поэтому для повышения эффективности этого этапа производственного процесса я предпринял следующие действия: перераспределение и удлинение жгутов проводов тестера для более организованного и удобного доступа к ним и подключения их к UUT, создание систем рока-уоке - которые безошибочно позволяют подключить все электрические и жидкостные соединения и ускоряют процесс подключения с минуты до 40 секунд, создание щита вокруг электрической панели для предотвращения урона электроплате в результате разлива охлаждающего вещества и редизайн жидкостных коннекторов. В редизайне я заменил сборку из примерно шести деталей всего одной кастомной деталью, что позволило получить более удобную эргономичную форму, устранить несколько точек утечек и потери давления на стыках компонентов и уменьшить количество компонентов в инвентаре проекта. Очень многие из этих проблем связаны с эргономикой рабочего пространства обслуживающего персонала, но также были и проблемы связанные с организацией документов проекта. Я реорганизовал CAD-сборку проекта, охарактеризовав и загрузив новые файлы в базу данных компании и заменил уже используемые детали на файлы из базы данных компании - что позволило стандартизировать CAD-сборку и упростить поиск компонентов для ремонта и создания станции на втором заводе компании в Китае.

В следующей части эссе я затрону следующие темы: цели и финансы, инвентарь и интеллектуальную собственность, персонал и команда, и временные характеристики процессов. Я проиллюстрирую свою работу в этих направлениях через мою работу в студенческой инженерной команде Cornell Hyperloop (Гиперлуп) как Президента и Главного Инженера-Механика команды, к которой я присоединился в октябре 2022 года. Cornell Hyperloop занимается разработкой миниатюрного электромагнитного поезда с бесконтактной

электромагнитной системой стабилизации и ускорения, а также разрабатывает технологию магнитной левитации. Эта, пожалуй, самая инновационная команда университета и на момент моего присоединения была достаточно молодая, несмотря на то, что была основана в 2017 году. Во время коронавируса многие технологии - например, связанные с композитами - были утеряны, ещё до моего прихода, однако значительная часть оборудования осталась. Помимо этого, я бы не поддержал многие технические и финансовые решения, которые были приняты в первые 2-3 года работы команды: я обнаружил очень много дорогих заказных алюминиевых деталей и частей системы движения - я считаю, что многие элементы поезда-капсулы (длина 2-3м, в зависимости от модели) были необоснованно дороги и могли быть значительно упрощены. В первые 1-2 года работы команда должна фокусироваться на создании простого работающего прототипа, что у первоначальной команды так и не получилось из-за усложнений конструкции и ограниченного бюджета (конечно, пандемия тоже является большим фактором). Потому, когда я занял должность Главного Инженера-Механика летом 2023 года, а позже и Президента команды зимой 2024, я убедил команду провести перезагрузку проекта и начать с создания MVP по принципам Agile, попутно внедрив системные изменения для оптимизации командных процессов. Первостепенная задача - создать прототип, а детальная оптимизация и техническое усложнение могут начаться чуть позже. Этот подход позволил нам выйти на соревнование Canadian Hyperloop Challenge в прошлом году с полностью интегрированной, пускай и упрощенной, системой. В этом году основной задачей является развитие и документация технологий, преимущественно связанных с магнитными системами, а также развитие компетенций в работе с системами охлаждения, пневматикой, и композитами.

Самые крупные изменения были сделаны в целеполагании и финансах: к вышеперечисленным целям развития MVP добавились задачи создания и качественной документации процессов сборки и производства деталей, повышение квалификаций членов команды и максимально быстрое восстановление и развитие ключевых технологий. При этом, на команду были наложены определенные ресурсные ограничения: команда имеет доступ к выделенному университетом пространству, мастерской с ручными и ЧПУ станками, доступ к компьютерам и программному обеспечению, финансированию от университета в размере \$10000 в год и некоторым другим ресурсам. Накладывается и ограничение студенческой специфики команды: студенты могут уделять команде порядка 5-6 часов в неделю и многие имеют ограниченный практический опыт работы. Исходя из этого, выстроенная работа должна быть максимально эффективна с точки зрения финансов, временных затрат, и организации рабочего пространства. Для мониторинга задач и результатов была подключена система ClickUp.com, которая помогает отслеживать как индивидуальные проекты, так и общий таймлайн движения проекта - её внедрение оказалось эффективным шагом в планировании работы и выполнения дедлайнов, а также в объединении членов разных подкоманд (например, Power Systems Subteam и Braking Subteam) для работы над общим проектом. Особенно полезным оказался функционал назначения задач конкретным членам проектов, ибо это вносит дополнительную ясность в процесс и обязанности членов команды. Для сохранения финансовых ресурсов была введена система создания заказов для осуществления закупок для систем поезда: члены команды собирают заказы и направляют их лидерам подкоманды, который подтверждает заказ и отправляет на финальное подтверждение президенту команды и держателю командной карточки (то есть мне) - такой подход позволяет отфильтровать неэффективные заказы от эффективных и ограничить траты; в прошлом году эта система снизила затраты на оборудование примерно на 5-6% от плановых, что в такой сложной финансовой ситуации достаточно значительно. Конечно, такая фильтрация создает проблему лишней обработки - потери в производстве, однако для сохранения финансов она оказалась критически важна. В дополнение к этому, при обновлении дизайна решение было принято в сторону модификации старых деталей для создания новых, что также снизило затраты на материалы. Также для достижения финансовых целей были введены меры повышения активности членов команды в участии в краудфандинге, что позволило увеличить сборы осенью 2024 до абсолютного рекорда в \$12,700 и создать проекту финансовую подушку в 2025 году.

Следующим шагом были оптимизация рабочего места и инвентаря. Были введены меры для снижения задержек в получении деталей и материалов, меры достижения стандартизации и меры улучшения организации рабочего места. Мы стали заказывать критические компоненты подсистем за ~2 недели до момента их использования в соответствии с принципом Just-in-Time: такой размер окна позволяет избежать простоев, связанных с отсутствием компонентов и при этом не захламляет инвентарную, ведь детали быстро собираются в готовые сборки. Элементы крепления (болты, гайки и др.), материалы (Al 6061-T6) и компоненты электроники были стандартизированы, и их запасное количество поддерживалось в течение года, а инвентарная часть была переформирована для хранения актуальных проектов и типовых деталей в самых легкодоступных позициях при разбиении по типам проектов - электроника/оборудование для тестирования/инструменты и т.д. Для сохранения командных документов, дизайнов, и прочей документации была внедрена платформа Confluence в дополнение к уже используемому хранилищу команды в Google Drive. Там представлена основная информация о системах и указания на то, где можно найти нужные файлы.

Последней сферой улучшения операционной составляющей команды стали сама команда и организация ее взаимодействия. Во-первых, был установлен открытый формат командных встреч (например, команды инженеров-механиков) в котором приветствуются активная дискуссия и вовлеченность в проблемы других проектов. В своих слайдах каждый член команды рассказывает об успешно выполненных задачах, трудностях, и планах его работы на следующую неделю по методу Scrum. Это позволило инженерам ощущать чувство ответственности и собственности над своими проектами и получать рекомендации от других инженеров по улучшению его проекта и по решению сложностей - это делает встречи на ~30 минут длиннее, но значительно повышает квалификации инженеров и качество выполненной работы. Перед еженедельными встречами мы также начали делиться основными темами обсуждений, что дало участникам встреч возможность лучше изучить материал и принести больше пользы в обсуждениях. Для организации работы по проектам были созданы проектные чаты, где теперь находились члены нескольких подкоманд, если они работали над одним и тем же проектом. Это простое изменение позволило устранить случаи прямых сообщений людей друг другу и позволило всем оставаться в курсе движения проектов и изменений в дизайне, а также упростило поиск информации связанной с проектами. Для ускорения работы над наукоемкими проектами мы начали приоритезировать привлечение студентов факультета физики университета для вступления в команду - они оказались более способными в моделировании многих физических принципов, связанных с электромагнетизмом, чем инженеры-механики. Наконец, было заключено партнерское соглашение с компанией Solidworks по предоставлению команде лицензий на персональные компьютеры, благодаря чему студенты смогли работать над командными проектами из дома во время каникул.

Таким образом, мой опыт повышения операционной эффективности связан с несколькими очень разными командами из моего университетского опыта, и основные изменения были предприняты в инженерной команде Cornell Hyperloop. Этот обширный опыт работы над разными проектами позволил мне столкнуться с многими проблемами и разработать и внедрить различные способы повышения операционной эффективности. Не все изменения легко вводились, но главным результатом является то, что диалог с членами команды и практический эксперимент использования новой системы являются главными факторами для достижения успеха при внедрении изменений.

Приложение:



Рисунок 1: Станция 3Д-Печати Бетонных Конструкций

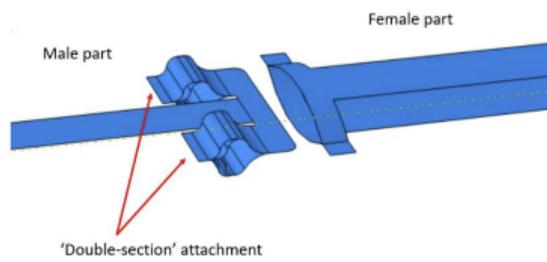


Рисунок 2: Модель Соединения, Master Mold и Части Силиконовой Формы