

# Применение CFD-моделирования при проектировании ангара для покраски самолетов

© 2020 АО «ЦИФРА» (Центр Инженерно-Физических Расчетов и Анализа)

В условиях конкуренции и повышенного внимания к охране окружающей среды те компании, которые специализируются на покраске крупных промышленных объектов, как никогда внимательно следят за альтернативными технологиями и процессами, позволяющими повысить эффективность. Это же относится и к автомобилям: за последнее десятилетие были разработаны новые стратегии и подходы, повышающие эффективность и гибкость технологического процесса, снижающие основные и эксплуатационные расходы и минимизирующие негативное воздействие на окружающую среду, но в то же время обеспечивающие получение лакокрасочного покрытия мирового класса. Сегодня в области покраски авиационной техники тоже наблюдается тенденция, в рамках которой производители самолетов, желающие повысить качество и снизить эксплуатационные расходы, начинают применять стратегии, ранее разработанные и опробованные автомобильными лакокрасочными предприятиями.

## Требования при проектировании покрасочных ангаров

Авиационные компании при проектировании и строительстве новых производственных мощностей и цехов ставят перед собой задачу создать такой покрасочный ангар (стенд-распылитель), в котором можно обеспечить максимально высокое качество лакокрасочного покрытия и добиться «выставочного» внешнего вида самолетов. При этом они стремятся использовать методы и стратегии проектирования покрасочных стендов, традиционно применяемые при проектировании автомобильных покрасочных камер, что позволяет улучшить внешний вид самолетов, минимизировать энергопотребление и общее воздействие на окружающую среду.

Ангар для покраски авиатехники должен предоставлять хорошо вентилируемое, чистое пространство с регулируемой температурой. Вентиляция необходима для того, чтобы обеспечить удаление опасных паров и распыленных частиц краски. Кроме того, для достижения высокого качества покраски важно, чтобы вентиляционный воздух циркулировал вокруг самолета равномерно. Как правило, в ангарах для покраски небольших самолетов создается продольный горизонтальный поток, за счет которого вентиляционный воздух, подаваемый возле носа, распространяется далее вдоль фюзеляжа. Затем воздух

удаляется из покрасочного ангара на некотором расстоянии позади самолета. Такая конструкция покрасочного ангара эффективна с точки зрения энергопотребления (расход воздуха относительно невелик), однако основной проблемой становится возможная зернистость слоя краски. Шероховатость возникает за счет частиц, высушенных в аэрозоле при переносе продольным воздушным потоком распыляемой краски от носовой к кормовой части. Такой дефект может оказаться неприемлемым – например, для представительских самолетов.

Чтобы уменьшить вероятность возникновения эффекта шероховатости, в покрасочном ангаре рекомендуется использовать технологию нисходящего потока, как и при покраске автомобилей. В этом случае краска распыляется сверху вниз и в стороны от самолета – тем самым устраняется эффект высыхания частиц и обеспечивается более гладкое покрытие. Однако, по сравнению с методом продольного потока, здесь имеются два существенных недостатка:

- для обеспечения достаточной вентиляции требуется больший поток воздуха, что приводит к более высоким начальным затратам на проект, а также к более высокому потреблению энергии;
- под горизонтальными участками (то есть, под крыльями) часто возникают зоны рециркуляции, что затрудняет эффективное нанесение аэрозольного покрытия.

## Применение CFD-моделирования для расчета покрасочных ангаров

Для преодоления этих неблагоприятных факторов необходимо применять современные инструменты и методы вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics, CFD*). Алгоритмы газодинамических расчетов, реализованные в программных системах типа *ANSYS Fluent/CFX*, являются единственным средством, позволяющим выполнить точный расчет параметров и оценить воздушные потоки в трехмерном пространстве ангара.

Вычислительная гидродинамика предлагает набор математических методов, как правило, реализованных в виде программных средств, которые могут быть использованы для выполнения сложных расчетов движения потока газа и термодинамических расчетов. К CFD-расчетам часто прибегают при проектировании автомобильных покрасочных камер для обеспечения равномерного потока воздуха вокруг окрашиваемого

автомобиля – это необходимо для эффективного переноса краски и получения высококачественного покрытия. Аналогичный подход можно применить и при разработке проекта ангара с нисходящим потоком для покраски авиатехники, что позволяет оптимизировать конструкцию, как показано на рис. 1, 2. При этом минимизируются требования к расходу воздуха при обеспечении достаточного потока воздуха вокруг самолета.

Рассчитывать равномерность воздушных потоков в гидравлическом приближении, используемом в традиционных вентиляционных расчетах, чрезвычайно трудно, и точность такого расчета будет невелика. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие систем технологической и общей вентиляции, что затруднительно реализовать методами, применяемыми в упрощенных вентиляционных расчетах. Требования СНиП II-33-75 “Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха” предполагают соблюдение определенных условий движения воздуха вблизи рабочего места по окраске. Упрощенные вентиляционные расчеты, не включающие в себя расчет локальных потоков в отдельных частях окрасочного участка (то есть собственно трехмерную конфигурацию вентилируемого помещения с учетом его геометрических особенностей, расположения воздухораспределителей и воздухозаборников, а также объекта окрасочных работ), не позволяют получить такой информации, а, следовательно, и подтверждения выполнения требований СНиП.

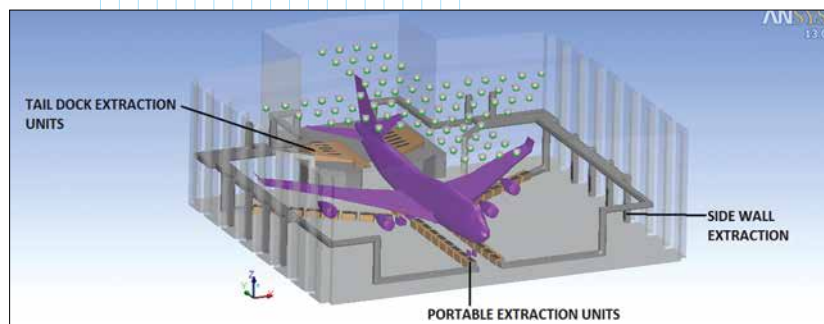


Рис. 1. Расчетная область покрасочного ангара

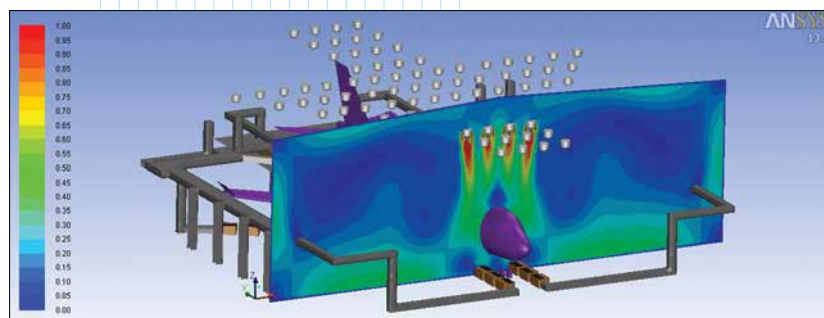


Рис. 2. Поле скоростей воздушных потоков в покрасочном ангаре. (Источник: CFD Modelling to Study the Flow Phenomena in an Aircraft Hanger)

В процессе проектирования покрасочного ангара должно быть обеспечено:

- максимально эффективное потребление энергии системой вентиляции;
- выполнение всех условий технологического процесса покраски;
- максимальную степень удаления частиц краски из рабочей зоны ангара;
- безопасность в случае изменения режимов функционирования системы вентиляции.

Оценка обеспечения технологических условий и удаления частиц должна выполняться не только интегрально по всему ангару, но и в каждой локальной зоне, с учетом габаритов цеха. Единственным методом, обеспечивающим точный расчет параметров и оценку воздушных потоков в трехмерном пространстве ангара, является трехмерное CFD-моделирование. При наличии профессионального программного обеспечения и вычислительных мощностей, соответствующих уровню сложности рассматриваемой задачи, методы вычислительной газодинамики позволяют производить визуализацию потоков частиц, оценивать концентрацию вредных веществ, распределение температуры в цехе и ряд других параметров. Это дает возможность еще на этапе проектирования системы оценить её эффективность и избежать финансовых потерь на этапе эксплуатации.

## Результаты моделирования покрасочного ангара авиатехники

Результаты CFD-моделирования показывают, что форма и расположение как приточного, так и вытяжного воздухозаборных отверстий имеют решающее значение для минимизации рециркуляционных потоков воздуха под крыльями самолета. Окончательный вариант оптимизированной конструкции покрасочного ангара включает в себя систему приточной вентиляции крестообразной формы в сочетании с отверстиями для отвода отработанного воздуха, расположенными в ключевых зонах под самолетом. При этом общий расход, требуемый для достижения расчетной скорости воздушного потока (0.3 м/с на расстоянии 1.5 м от самолета), оказался практически идентичен расходу воздуха, необходимому для эквивалентного ангара с горизонтальным продольным потоком.

## Стратегии обеспечения энергоэффективности покрасочных ангаров

На последующих этапах для минимизации эксплуатационных расходов в ангаре покраски самолетов можно привлекать те стратегии снижения энергопотребления, которые обычно

применяются на предприятиях по покраске автомобилей. Наибольшее количество потребляемой энергии расходуется на кондиционирование – регулирование температуры и влажности воздуха. Поэтому меры, направленные на уменьшение количества воздуха, нуждающегося в кондиционировании, являются наиболее эффективными для снижения энергопотребления при покраске.

Существует две стратегии, которые часто используются для минимизации энергопотребления в автомобильных покрасочных цехах. Первая – рециркуляция воздуха. За счет рециркуляции значительной части воздуха, отводимого из покрасочной камеры и снова подаваемого в нее, количество воздуха, которое должно быть полностью кондиционировано, значительно уменьшается, что приводит к значительному снижению энергопотребления. Это наиболее эффективный метод. Доля рециркулируемого вентиляционного воздуха зависит от химического состава и объема наносимого покрытия и может составлять до 80%.

Вторая стратегия снижения энергопотребления связана с контролем параметров воздуха сушильной линии – концепция, изначально разработанная поставщиками автомобильных красок в сотрудничестве с производителями оборудования для покраски автомобилей. Для каждого наносимого покрытия существуют свои требования к температуре и влажности воздуха, обеспечивающие такую скорость высыхания краски, которая дает высококачественное покрытие. Если воздух слишком холодный и/или сухой, растворитель из краски будет испаряться быстро, вызывая пузырьковый дефект. И наоборот, в слишком теплом и/или влажном воздухе растворитель будет испаряться гораздо медленнее. Это приведет к

тому, что вязкость наносимого покрытия будет низкой, что, в свою очередь, вызовет подтеки. Поэтому производители красок обычно указывают конкретные значения температуры и влажности воздуха, которые следует выдерживать, чтобы скорость испарения растворителя была достаточной для предотвращения дефектов.

Стратегия контроля параметров воздуха сушильной линии использует набор показателей вместо одного конкретного значения. Значения возможных показателей температуры и влажности расположены вдоль задаваемой рассчитанной кривой на психрометрической диаграмме, при этом каждая комбинация параметров соответствует определенной эквивалентной движущей силе испарения (давлению паров воды в воздухе) таким образом, что скорость высыхания краски одинакова при всех условиях вдоль сушильной линии. Преимущество данной стратегии заключается в том, что в более холодные месяцы вентиляционный воздух регулируется до более низких значений параметров на линии (в более теплые месяцы – наоборот). Это обеспечивает как экономию энергии, так и уменьшение затрат на коммунальные расходы. Требования к мощности нагревателей и чиллеров снижаются на 50% и 60% соответственно.

На рис. 3 показано, как за счет применения систем управления рециркуляцией воздуха и контроля параметров сушки в покрасочном ангаре может быть достигнуто снижение среднегодового энергопотребления на 58% по сравнению с традиционным вариантом ангара. В эту экономию входит уменьшение потребления природного газа (на 79 287 кубометров в год) и энергии на охлаждение воды (на 326 МВт·ч в год). Поскольку при производстве энергии выделяются парниковый газ  $CO_2$  и смогообразующие газы  $NO_x$ , снижение её потребления приведет к сокращению выбросов:  $CO_2$  – на 227 тонн в год,  $NO_x$  – на 690 кг в год. Такой эффект является существенным для получения экологически и экономически эффективного процесса финишной покраски авиационной техники.

Приведенные примеры проектирования с помощью CFD-моделирования являются иллюстрациями того, как проверенные стратегии проектирования автомобильных покрасочных камер могут быть применены при проектировании аэрокосмических покрасочных ангаров с целью повышения качества покрытия, а также экономической и экологической эффективности. 🍷

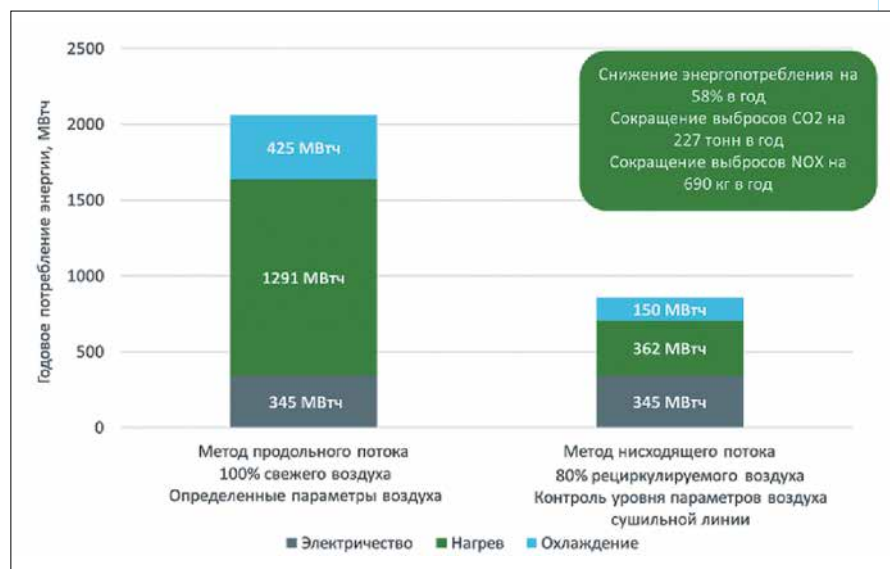


Рис. 3. Уменьшение энергопотребления при использовании стратегий рециркуляции воздуха и контроля уровня параметров воздуха сушильной линии в покрасочном ангаре