ТЕХНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ · ПЕРЕДНИЙ КРАЙ ГИДРОМЕХАНИКИ

Взрыв Навье–Стокса: держится ли ещё CFD вентиляторов?

Исследования Навье–Стокса 2026 года не отменяют CFD, а уточняют, где уравнениям можно доверять, а где инженеру нужны данные испытаний.

Техническая статья · Техническая редакция SUNXFAN · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/ru/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

В вентиляторной отрасли мы каждый день имеем дело с воздухом. Каждая дуга рабочего колеса и каждый профиль улитки опираются на один и тот же набор уравнений — уравнения Навье–Стокса. Они описывают движение вязкой жидкости и служат математическим фундаментом прогноза погоды, проектирования летательных аппаратов и аэродинамики любого центробежного и осевого вентилятора, который мы выпускаем.

Уже более двух десятилетий над этим фундаментом висит вопрос: в трёхмерном случае при гладких начальных данных остаётся ли решение гладким сколь угодно долго — или оно способно «взорваться» за конечное время, обратив скорость или завихрённость в бесконечность?

В 2026 году этот вопрос действительно перевернулся. Не потому, что был решён, а потому, что математическое сообщество начало всерьёз относиться к возможности, которой долго сопротивлялось: взрыв может быть собственным поведением жидкости в предельных условиях, а гладкость — случаем, требующим дополнительного объяснения.

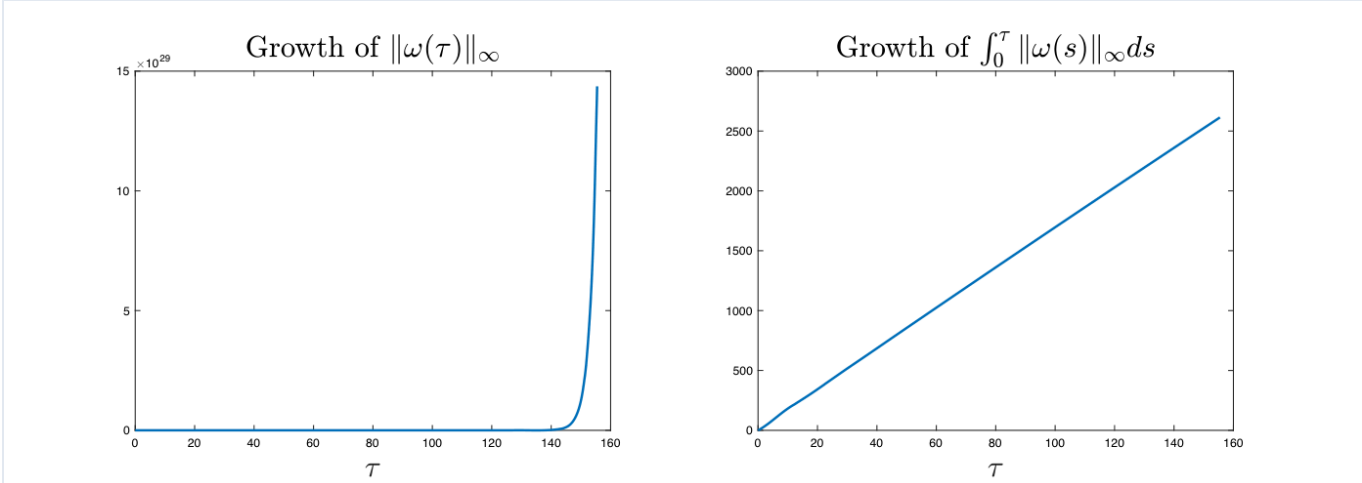


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

Рис. 1 — Эволюция завихрённости для трёхмерных уравнений Навье–Стокса в обобщённой осесимметричной постановке. Пиковая завихрённость резко возрастает за конечное время, а интегральная завихрённость нарушает критерий Била–Като–Маджи — именно такой численный след оставила бы сингулярность за конечное время. Оригинал рисунка: источник 1 (Hou, J. FoCM 2026, рис. 15/16).

1. Поворот 2026 года: три линии доказательств сходятся в одну точку

1.1 Форсированный взрыв от OpenAI: шок для отрасли, а не приговор

8 сентября 2026 года OpenAI объявила: мультиагентная система примерно за 88 часов построила взрыв за конечное время для трёхмерных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости с гладким финитным членом-источником, и результат проверен в Lean 4. Если читать только заголовок, кажется, что это прямой ответ на задачу тысячелетия.

Проверка не заставила себя ждать. Независимый аудит в Lean показал, что собранная формализация не передаёт рукопись на естественном языке с достаточной точностью: лемма 8.6 утверждает контроль

обратного оператора с m+4 производными, тогда как код Lean требует m+5. Более глубокая претензия касается самой постановки задачи. Версия для задачи тысячелетия — нефорсированная, с конечной энергией; конструкция OpenAI опирается на специально построенный гладкий источник, который непрерывно накачивает энстрофию в область высоких волновых чисел. То, что форсированный взрыв отвечает на нефорсированный вопрос, совершенно не доказано. Институт Клэя ничего не принял, а сама OpenAI заявила, что не будет претендовать на премию.

1.2 PINN от Caltech: автомодельный профиль в нефорсированной задаче

Контрапункт форсированному пути OpenAI — работа группы из Caltech, где с помощью физически информированной нейросети (PINN) построен автомодельный профиль взрыва для трёхмерных уравнений Эйлера: без источников, без границ, в свободном пространстве. Теренс Тао публично поддержал этот подход вечером накануне анонса OpenAI. Значение здесь методологическое: извне ничего не добавляется, уравнения сами порождают собственную сингулярность — это ближе к картине внутренней гидродинамической неустойчивости.

1.3 Консенсус смещается: от «доказать гладкость» к «понять взрыв»

Важнее любого отдельного доказательства то, что смещается сам консенсус. В 2026 году Тао прямо заявил: образ мысли в этой области изменился, и гипотеза регулярности теперь широко считается ложной — конкретные начальные данные приведут к взрыву за конечное время. В 2025–2026 годах независимые группы сообщали о конструкциях или весомых численных свидетельствах, основанных на цепочном растяжении вихревых трубок, топологической блокировке и каскадных механизмах. Коллективные усилия переходят от доказательства того, что решения остаются гладкими, к описанию того, когда и каким образом они перестают быть таковыми.

2. Геометрия взрыва: петля положительной обратной связи на растяжении вихря

Причина, по которой Навье–Стокс способен «убежать», — геометрический механизм, которого трёхмерное течение избежать не может: растяжение вихря. Если растягивать вихревую трубку вдоль её оси, сохранение момента импульса заставляет её вращаться быстрее и становиться тоньше; более быстрое вращение, в свою очередь, усиливает растяжение. Это петля положительной обратной связи. Математический вопрос состоит в том, всегда ли вязкая диссипация достаточно сильна, чтобы её удержать.

Численные результаты Caltech показывают следствие напрямую: в обобщённых осесимметричных уравнениях пиковая завихрённость растёт как $O(1/(T-t))$ за конечное время, а интегральная завихрённость нарушает критерий Била–Като–Маджи, что отмечает формирование сингулярности за конечное время. Роль вязкости здесь контринтуитивна. Поскольку вязкая регуляризация делает решение более гладким и устойчивым, она способна не подавлять, а, наоборот, укреплять нелинейное выстраивание, которое и вызывает растяжение вихря.

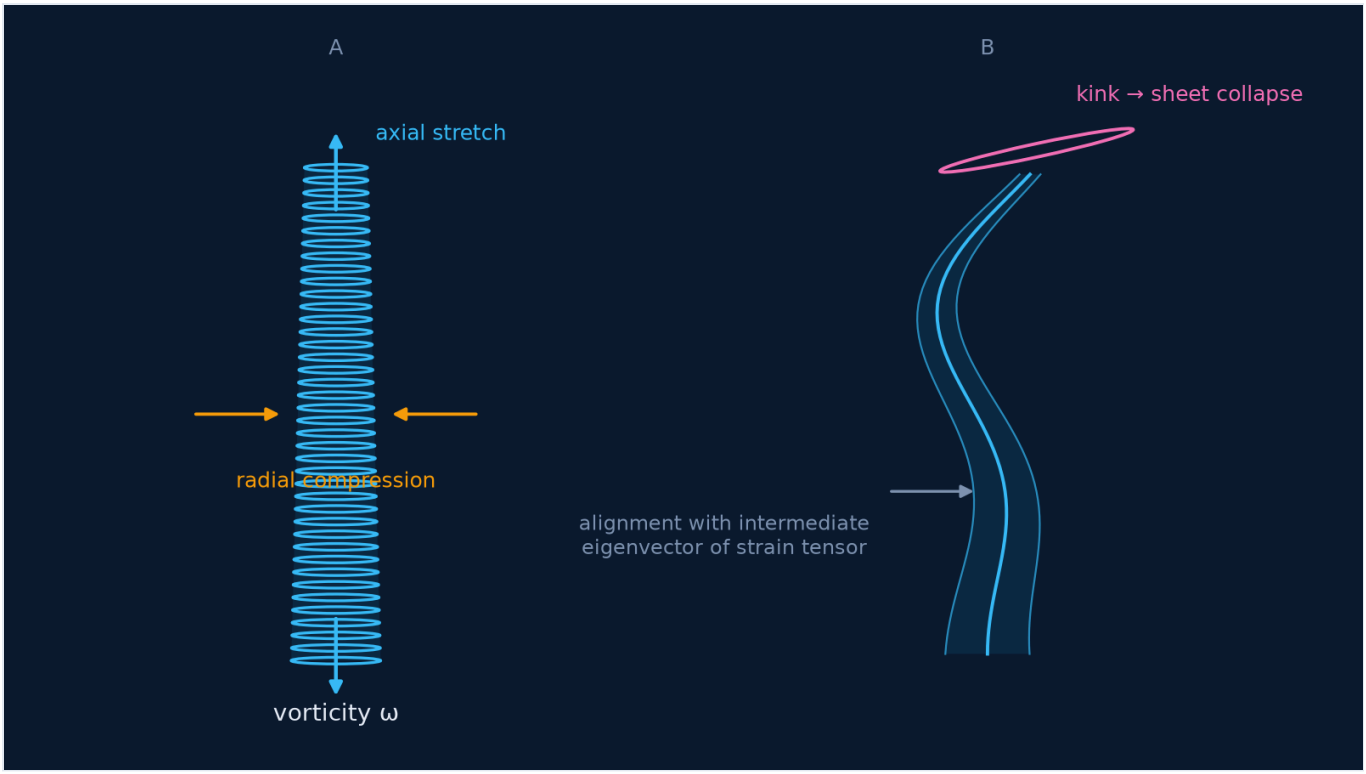


Рис. 2 — Схема растяжения вихревой трубки. Когда трубку растягивают вдоль оси и сжимают в радиальном направлении, завихрённость стремится выстроиться вдоль промежуточного собственного вектора тензора скоростей деформации, а трубка в итоге изламывается и коллапсирует в листы. Это геометрия самого члена растяжения. Оригинал рисунка: источник 2 (Ruhr-Universität Bochum, рис. 2.3); схема перерисована для наглядности.

3. Что это значит для проектировщиков вентиляторов: широко понимаемый превратно вывод

Распространённое ошибочное прочтение звучит так: раз Навье–Стокс может взорваться, значит CFD и построенное на нём проектирование вентиляторов недействительны.

Верно обратное. Взрыв — утверждение о континуальной модели при бесконечном разрешении в предельных условиях. Инженерная CFD такую задачу никогда не решает: она решает укрощённую версию — ограниченная геометрия, дискретная сетка, модель турбулентности RANS или LES и цель, заданная через осреднённое течение. В повседневной работе инженер борется не с завихрённостью, уходящей в бесконечность, а с резкими градиентами, недостаточно разрешёнными вихрями, отрывом и моделями замыкания, которые тихо перестают работать в некоторых режимах.

LES-расчёт 2025 года для осевых вентиляторов охлаждения электроники делает эту «инженерную негладкость» видимой. При обычных напорах (0 и 6 mmH_2O) поток на стороне всасывания остаётся безотрывным, парные входные вихревые трубки обладают хорошей когерентностью, а концевые перетёчные вихри ясно очерчены. При 12 mmH_2O у передней кромки появляется зона отрыва, и оторвавшийся вихрь закручивается к концу лопасти. В режиме стопорения, при 18 mmH_2O, входные вихревые трубки исчезают полностью, их сменяет хаотическая диффузная крупномасштабная

турбулентность, а зона отрыва на стороне всасывания разрастается примерно до 80% высоты лопасти и 20% хорды. Никакой сингулярности в этой картине нет — но факт есть: модели замыкания турбулентности держатся в безотрывном течении и теряют достоверность при обширном отрыве и стопорении.

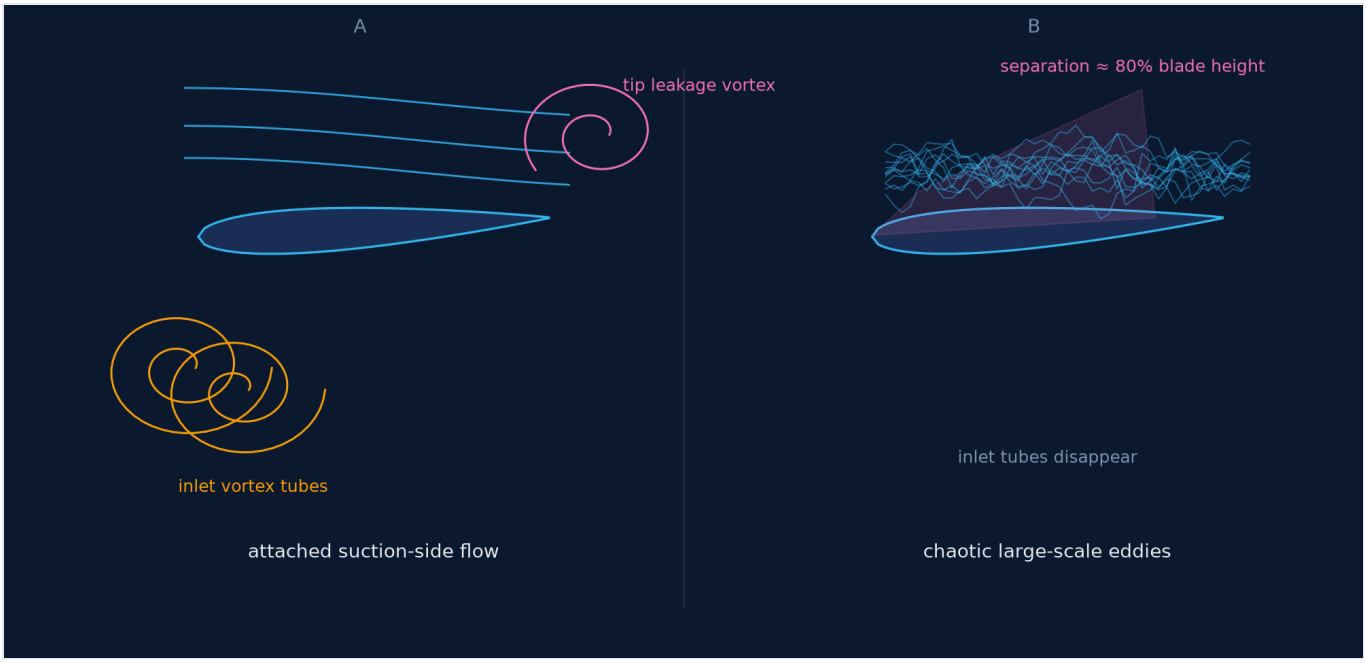


Рис. 3 — Структура течения осевого вентилятора: нормальный режим против стопорения. Слева — безотрывное течение на стороне всасывания с когерентными входными вихревыми трубками и чёткими концевыми перетёчными вихрями; справа — входные трубки исчезли, доминирует крупномасштабная турбулентность, а зона отрыва распространяется по всей лопасти. Это та негладкая реальность, с которой инженерная CFD имеет дело каждый день, и она же отмечает границу применимости модели замыкания. Оригиналы рисунков: источник 3 (Applied Acoustics 2025, рис. 15–18); схема перерисована.

4. Позиция SUNXFAN: точная модель — это переменная КПД и шума

Один легко недооцениваемый факт вентиляторной отрасли: каждый пункт аэродинамического КПД и каждый децибел снижения шума в конечном счёте берутся из более точного описания структуры потока.

Сохранит ли EC-центробежный вентилятор свою зону высокой эффективности при частичной нагрузке, зависит от того, остаются ли вторичные течения и отрывные вихри внутри рабочего колеса в заданном контуре. CFD-исследование центробежного вентилятора с многолопастным колесом и загнутыми вперёд лопастями выявило крупную зону рециркуляции в повороте на входе в колесо, выраженный отрыв, инициированный у передней кромки лопасти, и взаимодействие «струя–спутный след» между языком улитки и следом колеса — основной источник нестабильности течения и дискретного шума. Другое исследование внутреннего течения таких вентиляторов также наблюдало рециркуляцию и крупные вихри в межлопастных каналах уже в точке максимального КПД. Ничто из этого не является математической сингулярностью, но всё это — то же уравнение Навье–Стокса в инженерном масштабе.

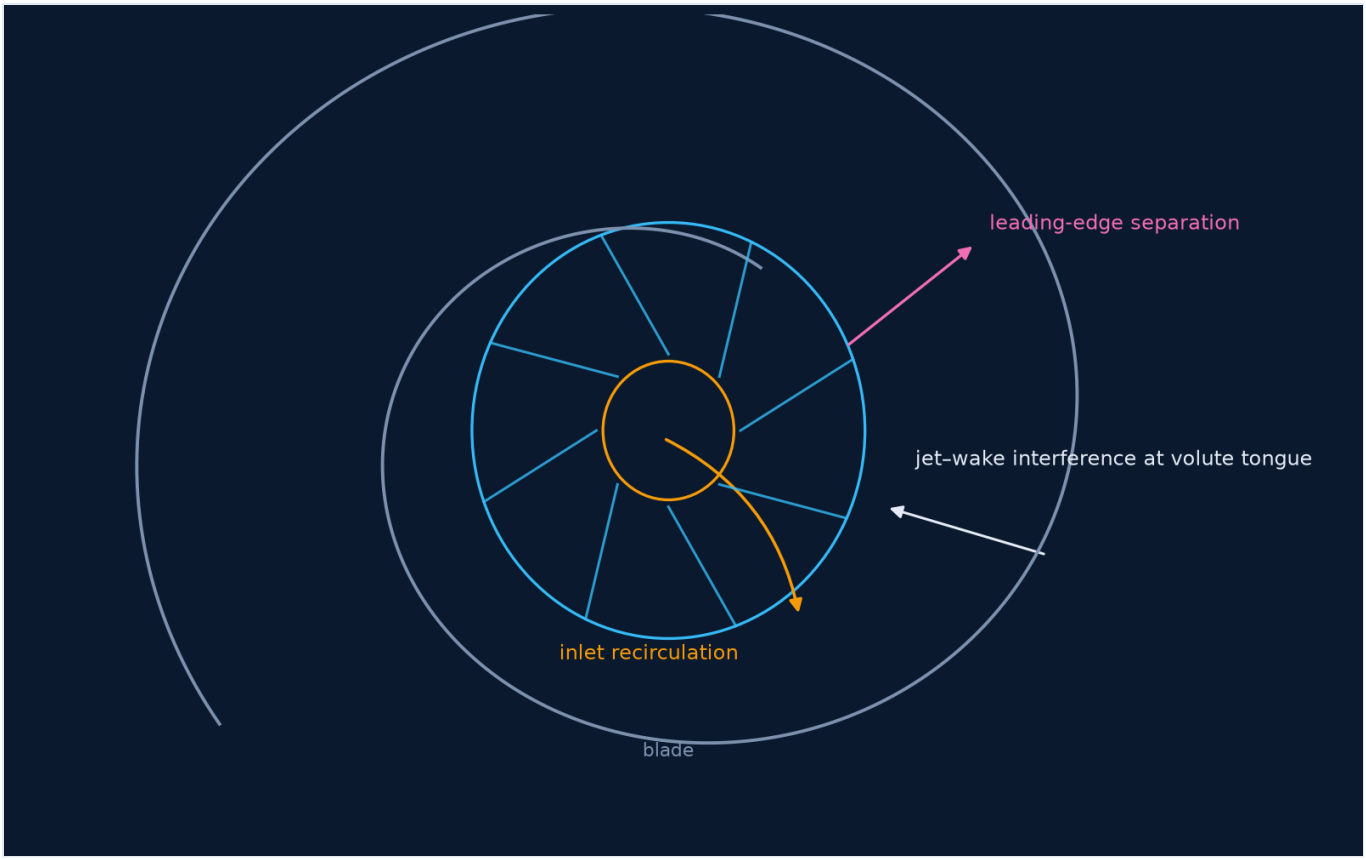


Рис. 4 — Линии тока и поле скоростей внутри центробежного рабочего колеса. Рециркуляция на входе, отрыв у передней кромки и интерференция «струя–спутный след» вблизи языка улитки — основные источники потерь КПД и дискретного шума. Сингулярности здесь нет, и тем не менее это уравнение Навье–Стокса в инженерном масштабе. Оригиналы рисунков: источник 4 (TU Darmstadt, рис. 9/12); схема перерисована.

Практическая ценность математического фронтира 2026 года — не в самом доказательстве взрыва, а в культуре расчёта, которую он поощряет: CFD с осознанием границ применимости, когда известно, какие режимы модель способна выдержать, а какие требуют локального сгущения сетки, другой модели замыкания или возврата к физическому эксперименту. Для задач HVAC, охлаждения ЦОД и систем накопления энергии, чистого воздуха и 800V HVDC, которые обслуживает SUNXFAN, это значит яснее различать, какие аэродинамические решения можно передать CFD, а какие должны опираться на измеренные данные.

5. Заключение: математика признаёт, что поток может «убежать», инженерия учится с этим жить

Проблема существования и гладкости для Навье–Стокса в 2026 году далека от решения. Результат OpenAI оспаривается, конструкция Caltech всё ещё ждёт независимой проверки, а миллион долларов Института Клэя остаётся невостребованным. Изменилось другое — исходное допущение: глобальная гладкость больше не воспринимается как данность, а структура, условия и последствия взрыва стали законной исследовательской целью.

Для инженера, стоящего за вентилятором, это знакомая позиция. Нам никогда не принадлежал мир постоянно гладкого течения. Нам принадлежат отрыв, смешение, нестационарность и пограничные слои, сражающиеся с неблагоприятным градиентом давления. Фронтир сдвинулся потому, что математика наконец признала на своём самом строгом языке то, с чем инженерия сталкивается ежедневно: воздух не всегда ведёт себя так, как должен. Настоящая инженерия по-прежнему выдаёт эффективный, тихий и надёжный вентилятор именно там, где воздух ведёт себя не идеально.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): быстрый рост максимальной завихрённости и критерий взрыва BKM в обобщённых осесимметричных уравнениях Навье–Стокса.
2. Ruhr-Universität Bochum, докторская диссертация, рис. 2.3: растяжение вихревых трубок и коллапс в листы.
3. *Applied Acoustics* (2025): LES осевых вентиляторов охлаждения электроники в нормальном режиме и в стопорении, рис. 15–18.
4. TU Darmstadt: CFD-анализ центробежного вентилятора, скорости и линии тока, рис. 9–12.
5. Zenodo, “A Structural Dismantling of OpenAI's ‘Finite-Time blowup for Navier–Stokes’”, сентябрь 2026.
6. Zenodo, “Navier–Stokes Lost in Translation”, октябрь 2026: о несоответствии формализации в Lean и о форсированной и нефорсированной постановках.
7. Terence Tao, публичные комментарии о сдвиге консенсуса по регулярности Навье–Стокса, 2026.

About SUNXFAN®: SUNXFAN выпускает промышленные центробежные и осевые вентиляторы EC, DC и AC для HVAC, терморегулирования ЦОД и систем накопления энергии, а также для задач чистого воздуха, включая вентиляторные установки для архитектур 800V HVDC. Мы убеждены, что неизменное внимание к самым фундаментальным вопросам гидромеханики — это то, что сохраняет вентиляторные системы эффективными и надёжными в долгосрочной перспективе.