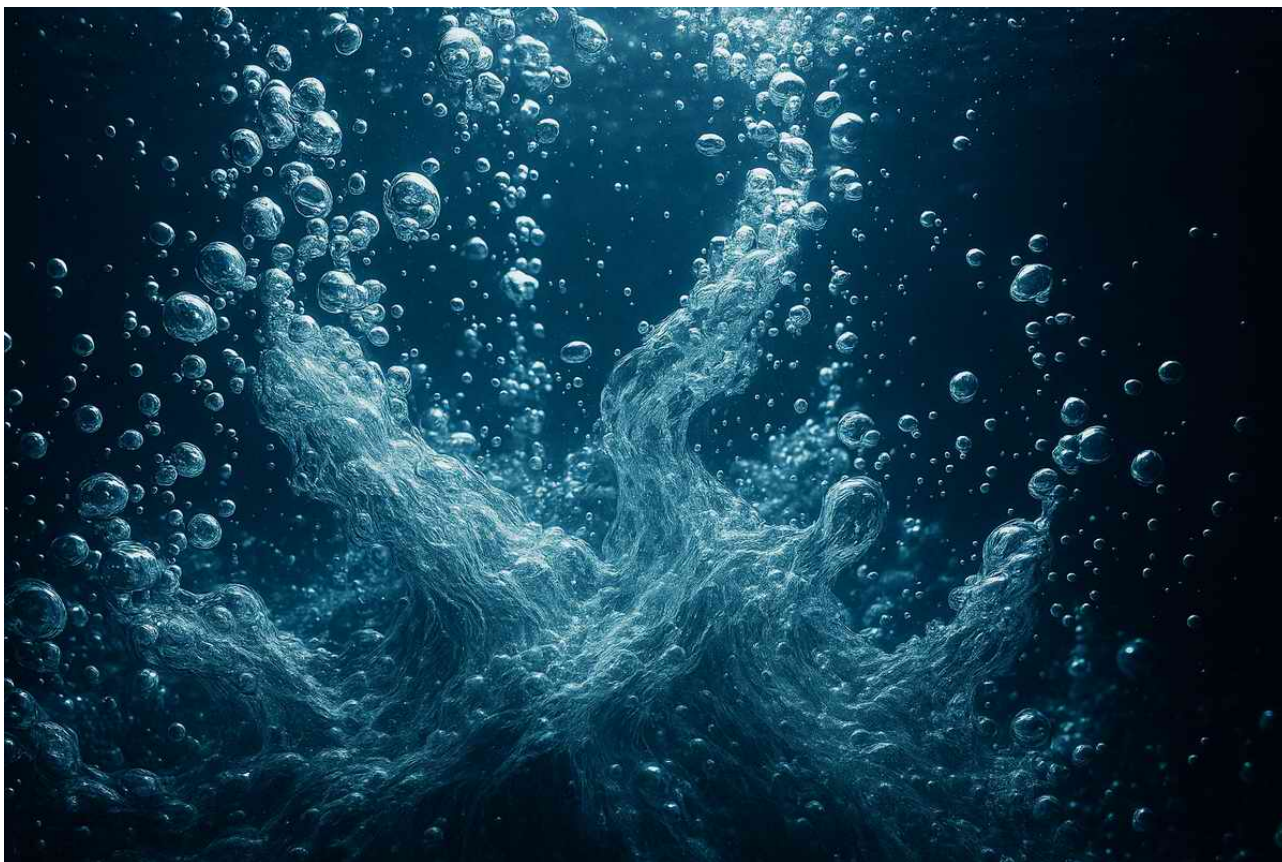


## Хаос пузырьков: как вековая теория Колмогорова объясняет турбулентность в воде



Дата публикации: 18.08.2025

Турбулентность — одно из самых загадочных и сложных явлений физики. Она проявляется везде: в облаках, океанских волнах, промышленных реакторах и даже в пенящемся стакане газированного напитка. Но если турбулентные вихри воздуха и воды уже давно изучаются на основе фундаментальной теории Андрея Колмогорова, то оставался открытым вопрос: применима ли эта теория к турбулентности, вызванной пузырьками газа в жидкости?

Международная группа исследователей из Гельмгольц-центра Дрезден-Россендорф, Университета Джонса Хопкинса и Университета Дьюка впервые получила экспериментальное подтверждение того, что классическая модель «скейлинга K41» Колмогорова описывает хаос, создаваемый пузырьками. Это стало возможным благодаря уникальным экспериментам с использованием четырёх высокоскоростных камер и трёхмерного отслеживания движения как пузырьков, так и крошечных частиц воды.

Вода помещалась в вертикальный резервуар шириной 11,5 см, куда снизу

впрыскивались пузырьки диаметром 3–5 мм. Эти пузырьки, поднимаясь вверх, начинали колебаться и создавать сложные вихревые структуры. Камеры фиксировали происходящее со скоростью 2500 кадров в секунду, что позволило рассмотреть процессы в мельчайших масштабах. Учёные воспроизвели разные сценарии, изменяя размер и концентрацию пузырьков, и обнаружили, что в некоторых случаях турбулентные потоки действительно подчиняются колмогоровскому закону, предсказывающему передачу энергии от крупных вихрей к всё более мелким до её окончательного рассеяния вязкостью.

Ключевым результатом стало то, что соответствие теории наблюдается в областях за пределами непосредственного следа пузырька. Внутри следа энергия слишком сильно возмущена, и классический каскад не формируется. Но в окружающей жидкости возникали вихри, чья динамика полностью совпадала с предсказаниями Колмогорова. Это первый раз, когда удалось экспериментально подтвердить такой эффект именно для пузырьковых течений.

Более того, исследователи вывели простую формулу для оценки скорости диссипации энергии в таких потоках. Она зависит всего от двух параметров: размера пузырьков и их плотности в жидкости. Эта модель точно совпала с результатами эксперимента и показала, что эффект Колмогорова усиливается при определённой комбинации этих параметров.

Однако существует естественное ограничение. Для полного проявления колмогоровского «инерционного диапазона» пузырьки должны быть значительно крупнее. Но в реальных условиях такие пузырьки нестабильны и распадаются, что делает невозможным создание идеальной турбулентности по K41. Тем не менее учёные показали, что в реальных условиях можно наблюдать приближение к этому режиму.

Это открытие имеет далеко идущие последствия. Оно позволяет точнее описывать процессы перемешивания в инженерных системах, например, в химических реакторах и установках очистки сточных вод. Кроме того, знание законов турбулентности пузырьков поможет климатологам лучше учитывать поведение океанских потоков, где газообмен с атмосферой во многом определяется пузырьковыми процессами.

Фундаментальная ценность работы в том, что теория, созданная Андреем Колмогоровым более 80 лет назад, снова подтверждает свою универсальность. Она оказывается применимой не только к турбулентности в воздухе или воде, но и к сложным многофазным системам, где взаимодействуют жидкость и газ. Это добавляет новые штрихи к пониманию хаоса в природе и открывает перспективы для более точного моделирования как в лаборатории, так и в масштабах планеты.

**Ссылка:** «Колмогоровское масштабирование в условиях турбулентности, вызванной пузырьками» DOI: [10.1103/v9mh-7pw1](https://doi.org/10.1103/v9mh-7pw1).