

# ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УСКОРЕНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

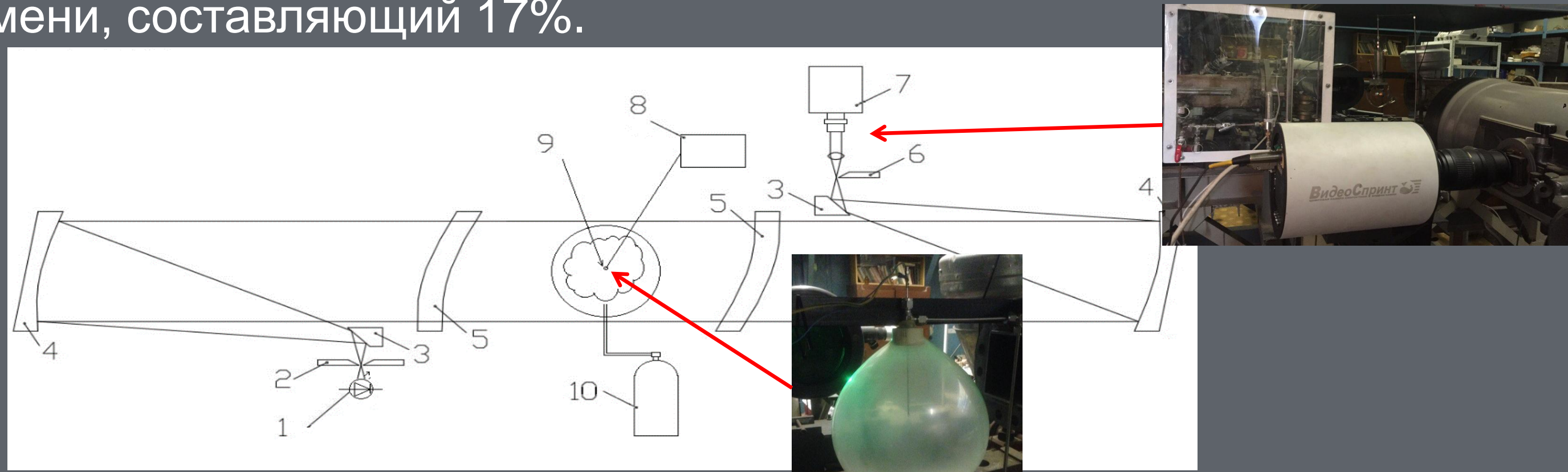
Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е.

Объединённый институт высоких температур РАН

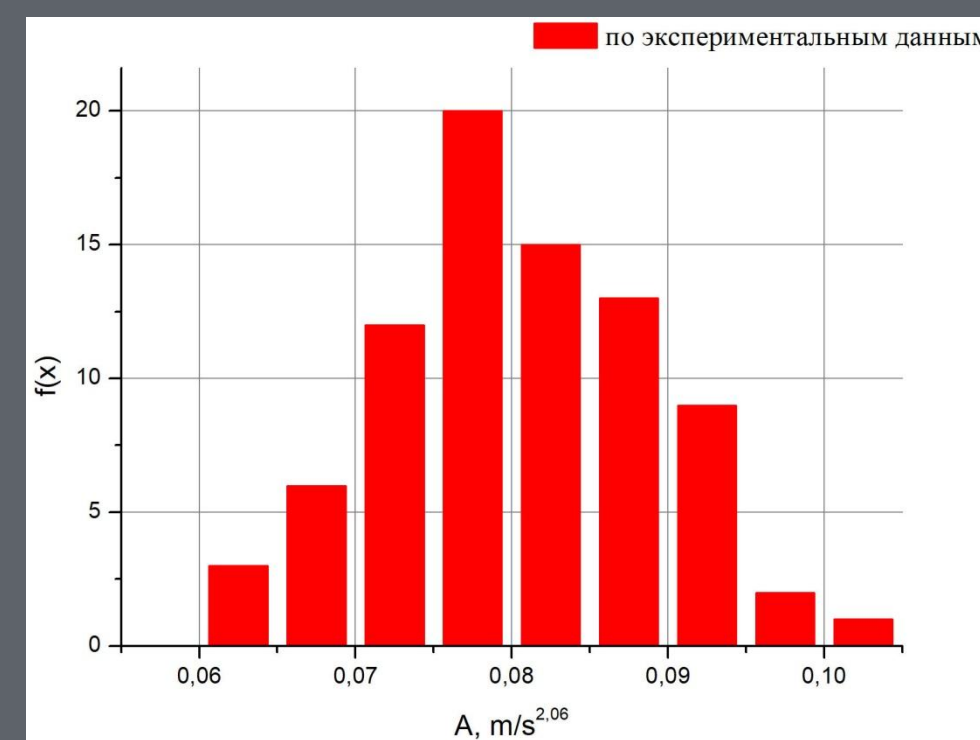
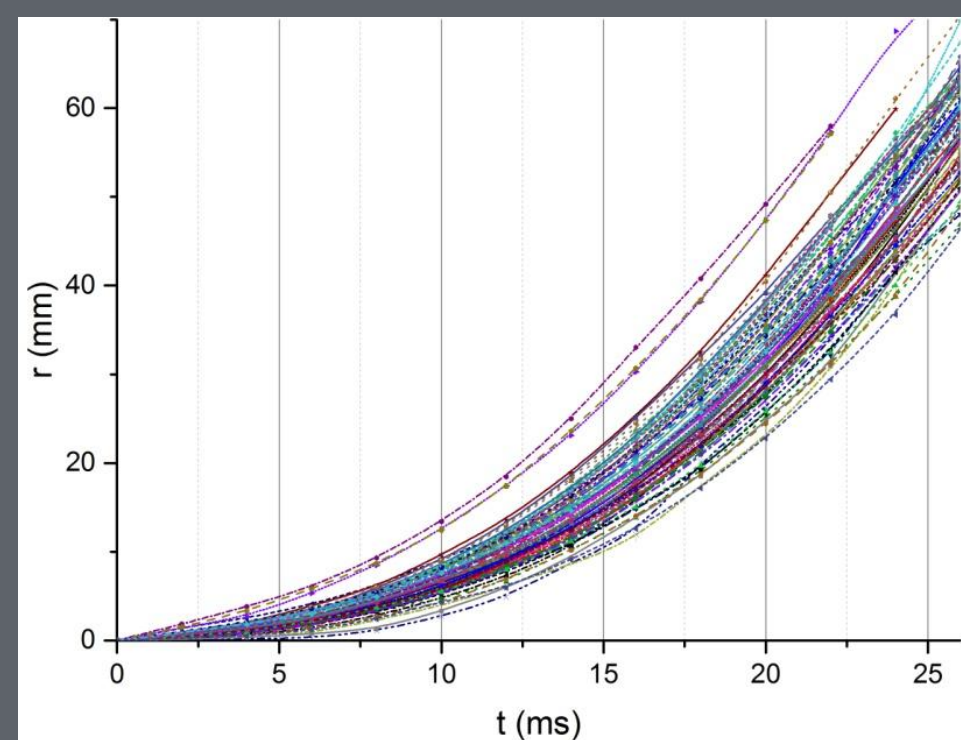
@ vlad@ihed.ras.ru

## ПРЕДПОСЫЛКИ РАБОТЫ

В ходе предыдущих экспериментальных исследований свободного распространения расширяющегося сферического пламени в смеси 15% водорода и 85% воздуха получен разброс параметров ускорения пламени, составляющий 17%.



Лабораторная экспериментальная установка: 1 – источник света; 2 – оптическая щель; 3 – диагональное зеркало; 4 – сферическое зеркало; 5 – мениск; 6 – нож Фуко; 7 – высокоскоростная камера; 8 – источник зажигания; 9 – искровой разрядник; 10 – система подачи горючей смеси.

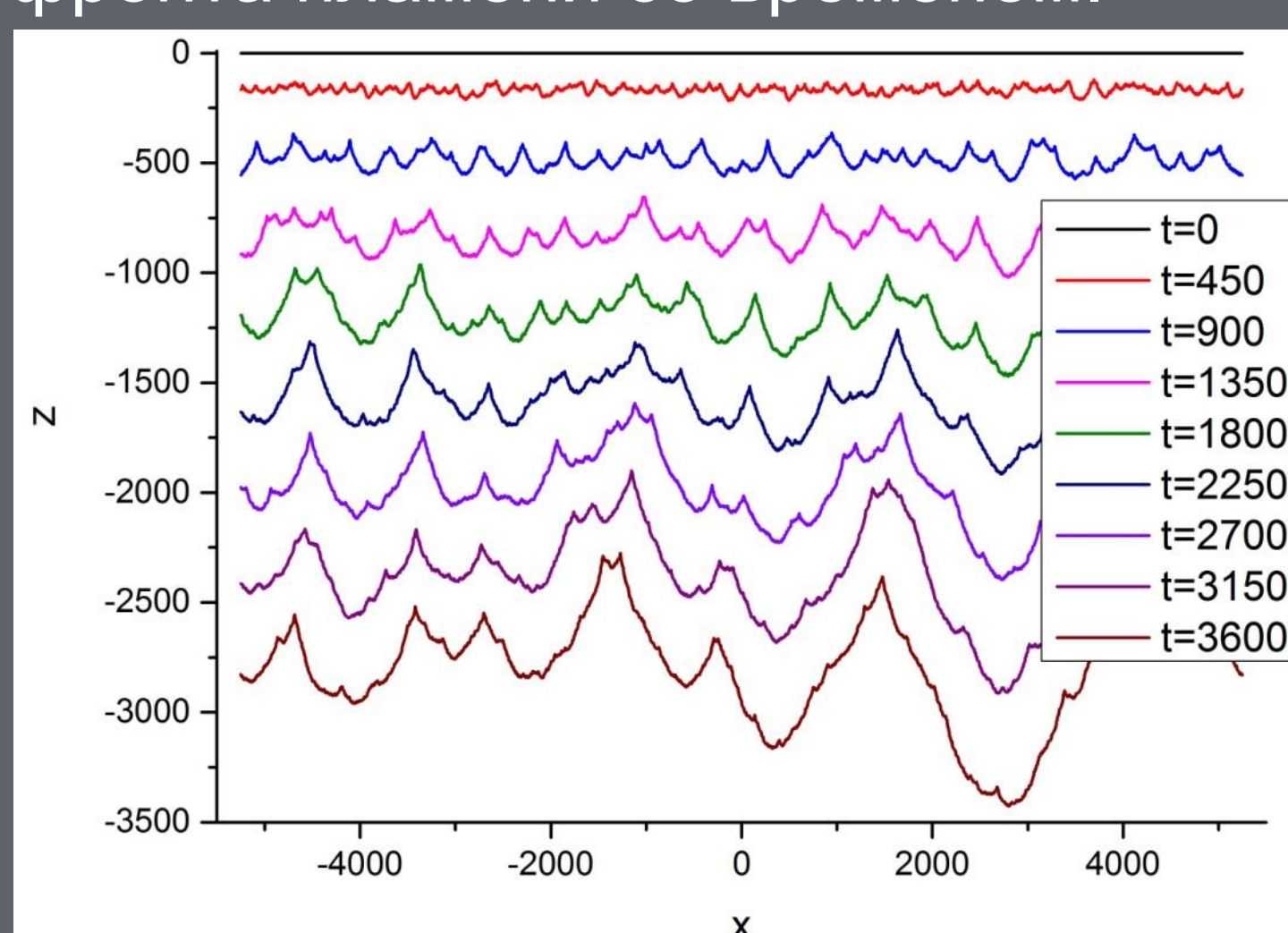


Зависимости среднего радиуса пламени от времени по результатам 84 экспериментов и гистограмма распределения предэкспоненциального множителя при аппроксимации степенной функцией вида  $r = At^{1.09}$ .

Поскольку горючая смесь для всей серии экспериментов готовилась предварительно в одной ёмкости, наблюдаемый разброс считается следствием различия в начальных возмущениях неустойчивого фронта пламени.

## ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА

При моделировании фронта пламени без начальных возмущений, фронт оставался прямым в течение сколь угодно длительного времени расчёта. При начальных возмущениях в виде ступенчатого распределения с шириной участка  $1 \lambda_{DL}$  и случайной амплитудой до  $1/1000$  толщины фронта пламени расчёт демонстрирует развитие неоднородностей фронта пламени со временем.



Профили пламени через 0.13, 0.25, 0.38, 0.51, 0.63, 0.76, 0.89 и 1.01 с после начала распространения. Смещение по вертикальной оси добавлено для лучшей видимости.

Проведено исследование сходимости по пространственному и временному шагу. Уменьшение шага на порядок приводит к отклонению зависимости рассчитанной скорости от времени менее чем на 1%.

## ВЫВОДЫ

Из представленных результатов эксперимента, численного моделирования и их анализа можно сделать следующие выводы:

- распространение искривлённого фронта пламени в изначально неподвижной газовой смеси возможно с различными скоростями при неизменных начальных условиях;
- при неустойчивом распространении складчатого фронта пламени, различия вызваны как погрешностью составления смеси, так и разными конфигурациями начальных возмущений, определяющих динамику развития структуры пламени, и, соответственно его скорости.

Приведенные результаты доказывают необходимость статистического описания ускорения ламинарного пламени и развития газовых взрывов.

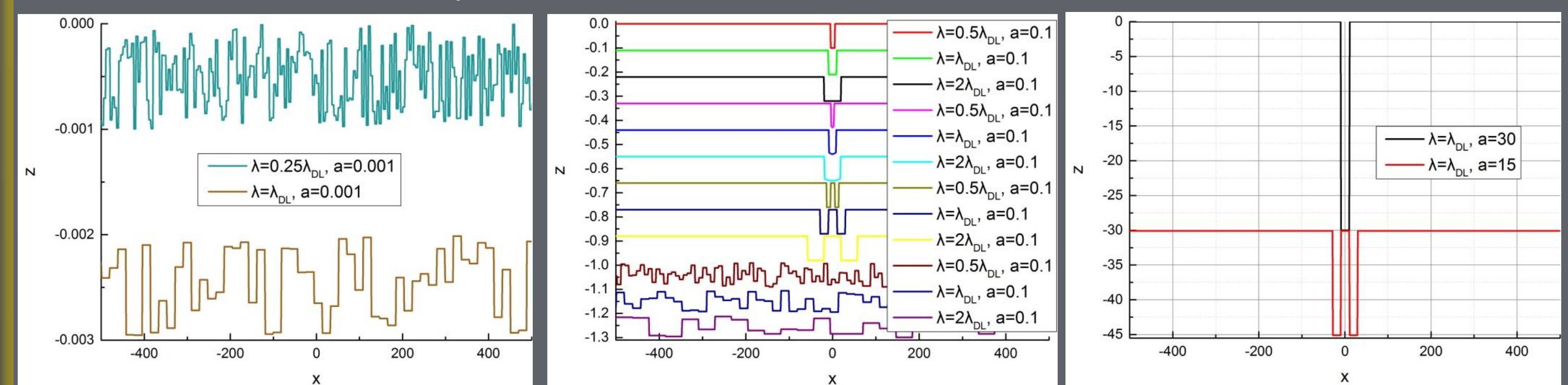
## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для проверки предположения проведена серия расчетов, включающая численное интегрирование уравнения Сивашинского в плоской 2D постановке в 15% водородно-воздушной смеси:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + Ze^2(1 - Le)^2 \nabla^2 \phi + \left( \frac{1}{2} Ze(1 - Le) - 1 \right) \nabla^2 \phi + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 = \frac{\theta - 1}{8\pi^2 \theta} \int_{-\infty}^{\infty} |k| \exp(ik(x-z)) \phi(z) dk dz.$$

Средняя скорость пламени рассчитывалась по приближённой формуле:

$$\phi(x, t) \rightarrow \Xi(t) = \frac{1}{X} \int \sqrt{1 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2} dx \quad U_f = \Xi U_L$$

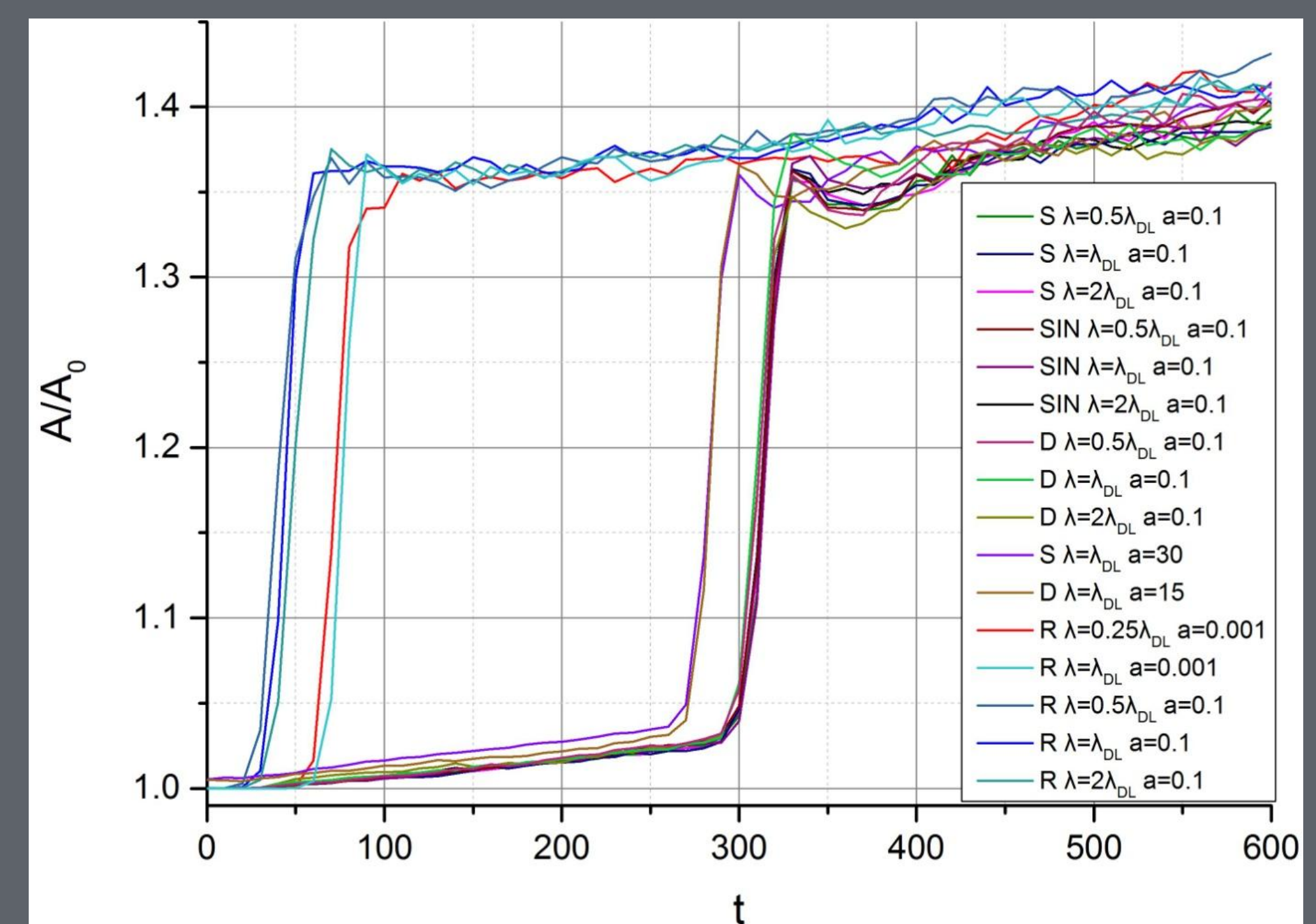


Начальные распределения возмущений фронта пламени.

В качестве начальных возмущений были заданы:

- ступенчатые распределения с шириной участка  $\frac{1}{4}$  и  $1 \lambda_{DL}$  (длины волны, соответствующей максимальной скорости роста по механизму Дарье-Ландау) и случайной амплитудой до  $1/1000$  толщины фронта пламени;
- единичные и сдвоенные прямоугольные и гармонические импульсы с шириной участка  $\frac{1}{2}$ ,  $1$  и  $2 \lambda_{DL}$  и амплитудой  $1/10$  толщины фронта пламени;
- ступенчатые распределения с шириной участка  $\frac{1}{2}$ ,  $1$  и  $2 \lambda_{DL}$  и случайной амплитудой до  $1/10$  толщины фронта пламени;
- единичный и сдвоенный прямоугольные импульсы с шириной участка  $\lambda_{DL}$  и амплитудой 30 и 15 толщин фронта пламени, соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ



Зависимости коэффициента складчатости пламени от безразмерного времени при различных начальных возмущениях.

Для всех начальных условий после определенного периода индукции наблюдается резкий рост коэффициента складчатости до значения  $\sim 1.35$ . Далее скорость роста зависит от начальных условий мало. Кратчайшее время индукции, когда начальные возмущения случайной амплитуды до 0.1 распределены по всей поверхности пламени. Уменьшение амплитуды начальных возмущений в 100 раз увеличивает время индукции в 1.5 раза. Время индукции фронта пламени с одиночными и двойными возмущениями амплитуды 0.1 в 15 раз выше. Увеличение амплитуды одиночного возмущения в 300 раз либо двойного в 150 раз сокращает время индукции незначительно. Ширина и форма начального возмущения практически не влияют на время индукции и скорость роста коэффициента складчатости. В момент времени 25 мс, что соответствует 90 безразмерным единицам времени в расчёте, величина коэффициента складчатости меняется от 1.006 до 1.345, что даёт в результате разброс скоростей распространения пламени 17.7% от среднего значения при различных начальных возмущениях фронта пламени. Аналогичная динамика ускорения сферически расширяющегося пламени приводит к различным значениям радиуса, при которых начинается интенсивное ускорение фронта пламени, а соответственно, определяет весь дальнейший ход развития горения. Полученный результат хорошо согласуется с экспериментальными данными.