



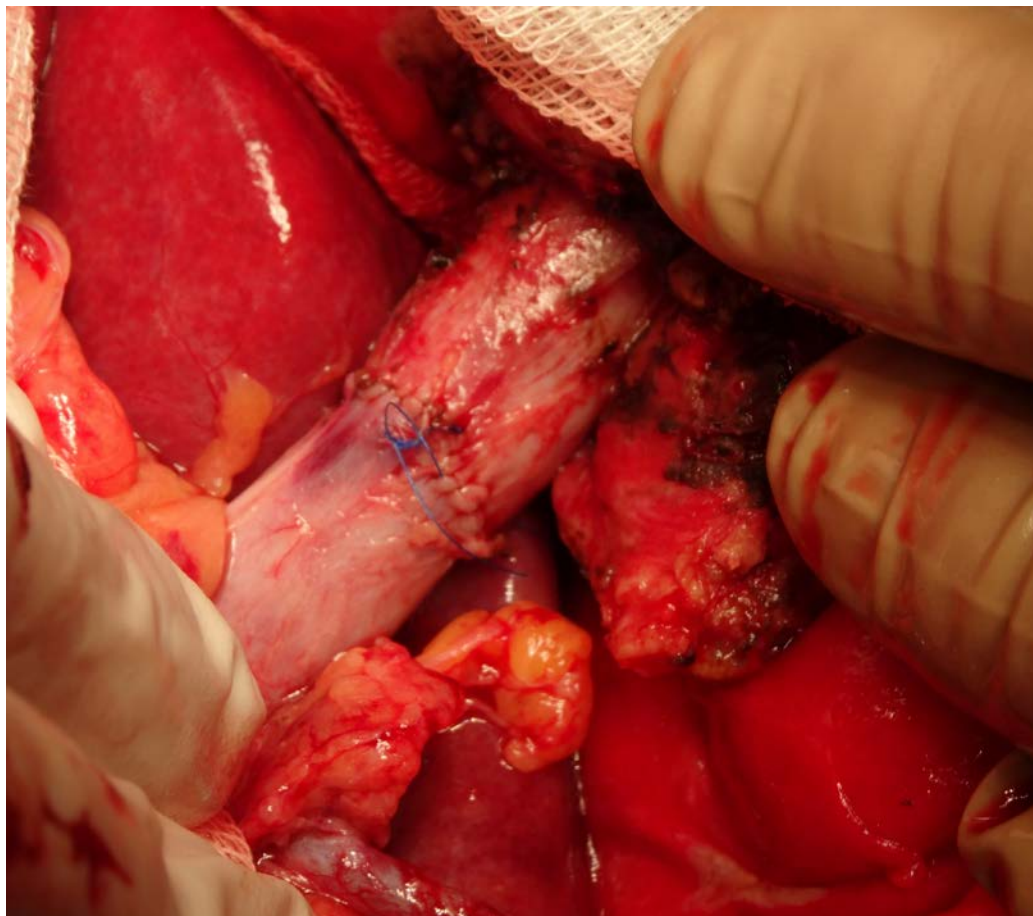
Универсальные зависимости генерации тромбина в математической модели проточного реактора

А.И. Лобанов, МФТИ
А.А. Андреева, МФТИ
С.В. Панюков, МФТИ,
А.А. Сибирякова, МФТИ, Сколтех

17 октября 2025

Москва

**XVII конференция «Математические модели и численные методы
в биологии и медицине»**



Простейшая модель

Входное
сечение



v

Реакционный объем



L

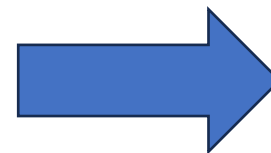
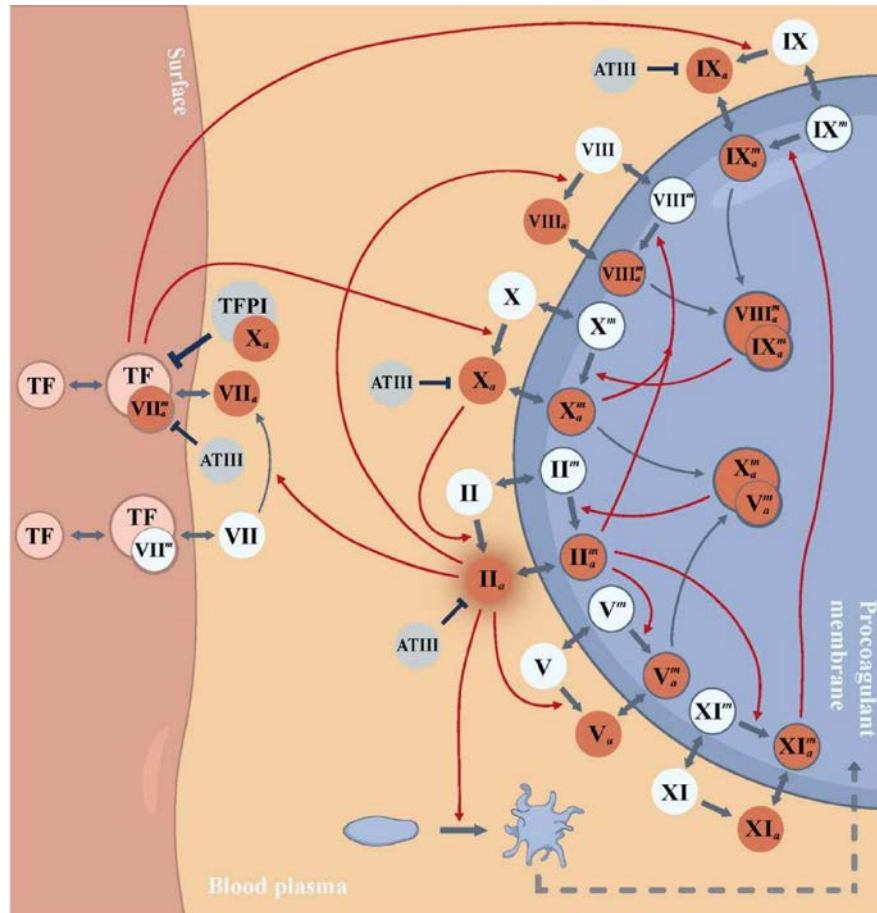


Схема реакций каскада свертывания



Уравнения математической модели

- В системе ОДУ всего 18 уравнений. Их можно разделить на 4 группы
- 1 группа – инициация процесса, реакции на поверхности эндотелия

- $$\frac{d[TF]}{dt} = -\frac{R}{2} k_a^{VII,TF} [VII][TF] +$$

-

$$k_d^{VII-TF} [VII - TF] - \frac{R}{2} k_a^{VIIa,TF} [VIIa][TF]$$

- $+k_d^{VIIa-TF} [VIIa - TF],$

Уравнения математической модели

- 2 группа – инициация процесса свертывания, реакции в плазме крови

- $$\frac{d[VIIa]}{dt} = -k_a^{VIIa,TF} [VIIa][TF] + \frac{2k_d^{VIIa-TF}}{R} [VIIa - TF] - \frac{1}{r} ([VIIa] - [VIIa](0)),$$

- Здесь $r = \frac{L}{V}$ - среднее время пребывания жидкой частицы в реакционном объеме

Уравнения математической модели

- 3 группа – производство тромбина, реакции в объеме плазмы и на поверхности мембран

- $$\frac{d[II]}{dt} = - \frac{k_{cat}^{II,Xa} [Xa][II]}{K_M^{II,Xa} + [II]}$$

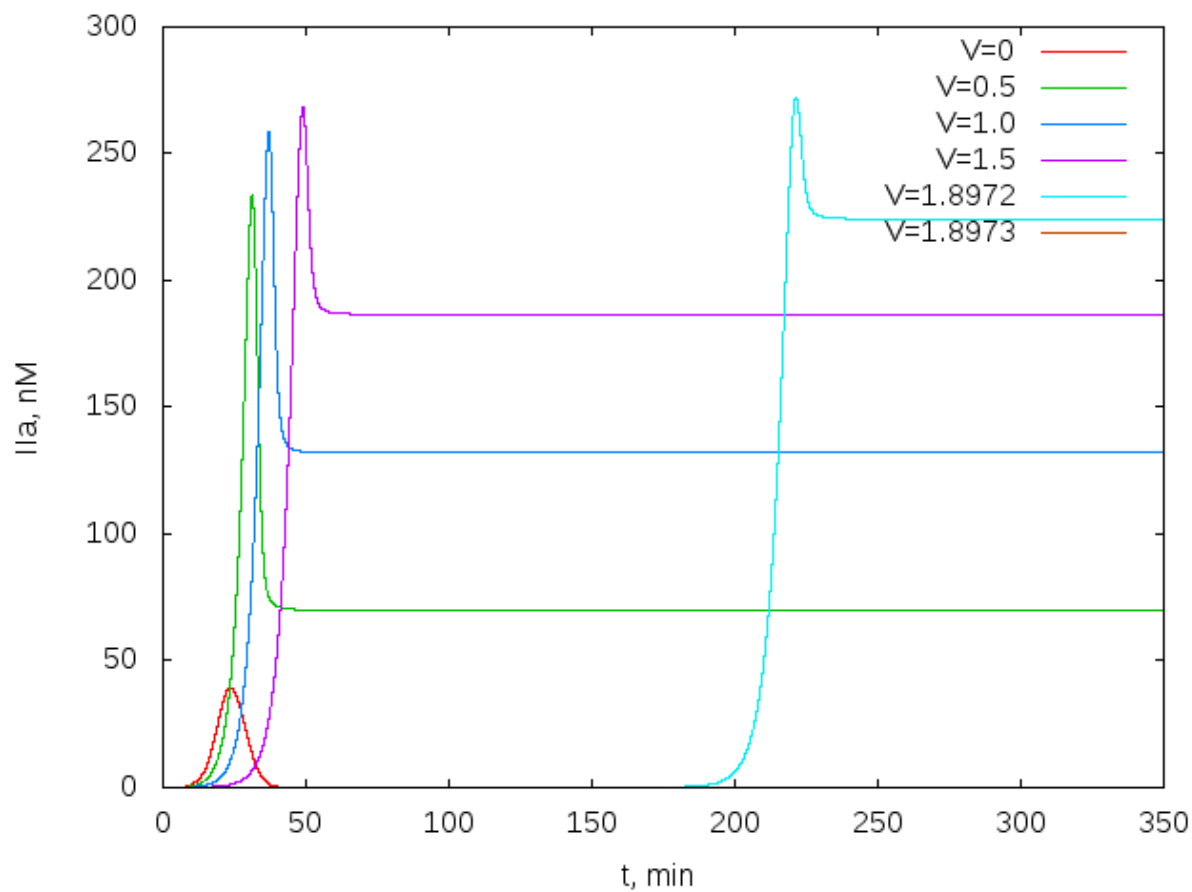
- $$- \frac{k_{cat}^{II,Xa-Va} [Xa][Va][II]}{(K_d^{Xa-Va} + [Xa] + [Va])(K_M^{II,Xa-Va} + [II])} - \frac{1}{r} ([II] - [II](0)),$$

Уравнения математической модели

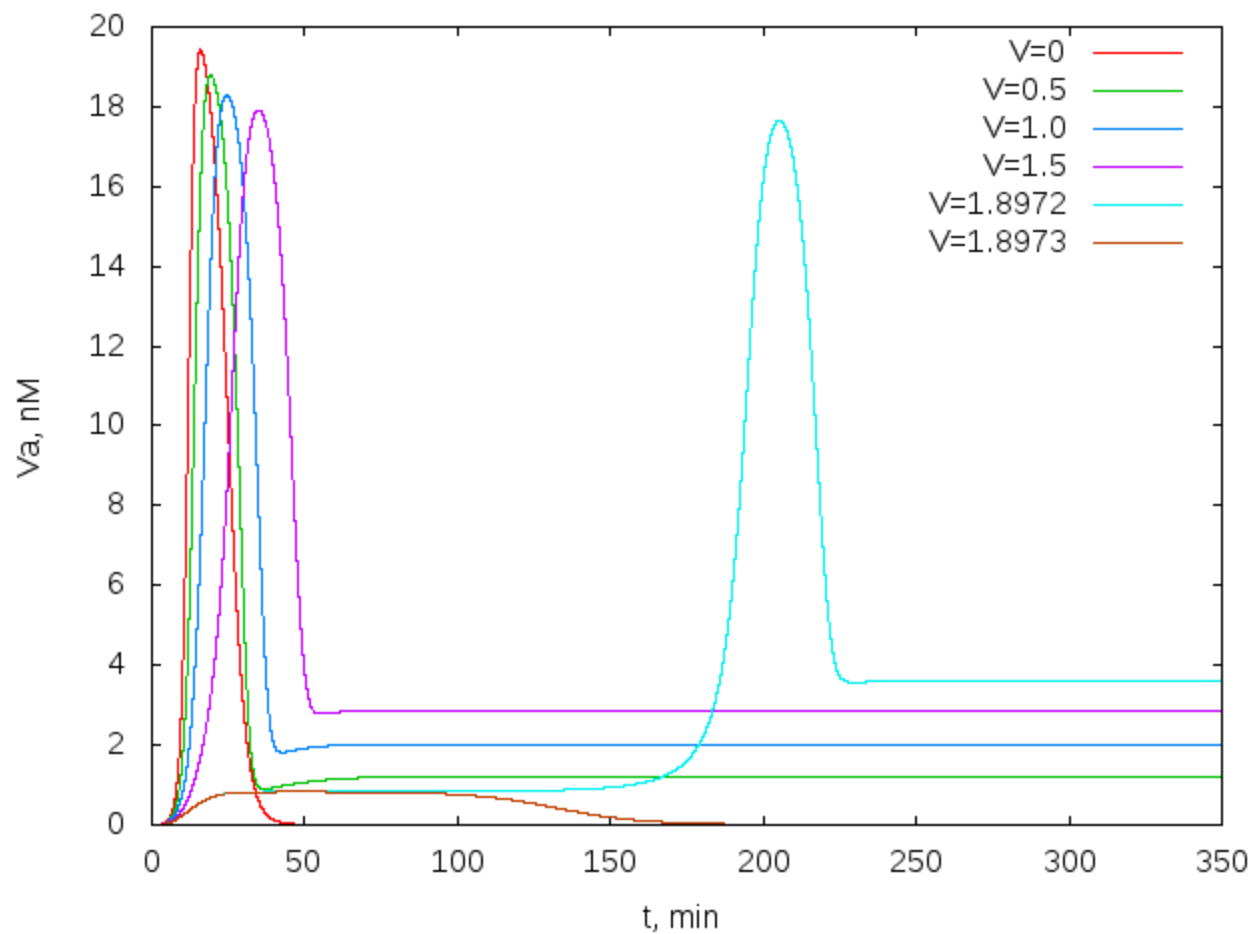
- 4 группа – расщепление фибриногена, производство фибрина.

- $$\frac{d[Fn]}{dt} = \frac{k_{cat}^{Fg,IIa} [Fg][IIa]}{K_M^{Fg,IIa} \left(1 + \frac{[Fg]}{K_M^{Fg,IIa}} \right)} - \frac{1}{r} ([Fn] - [Fn](0)).$$

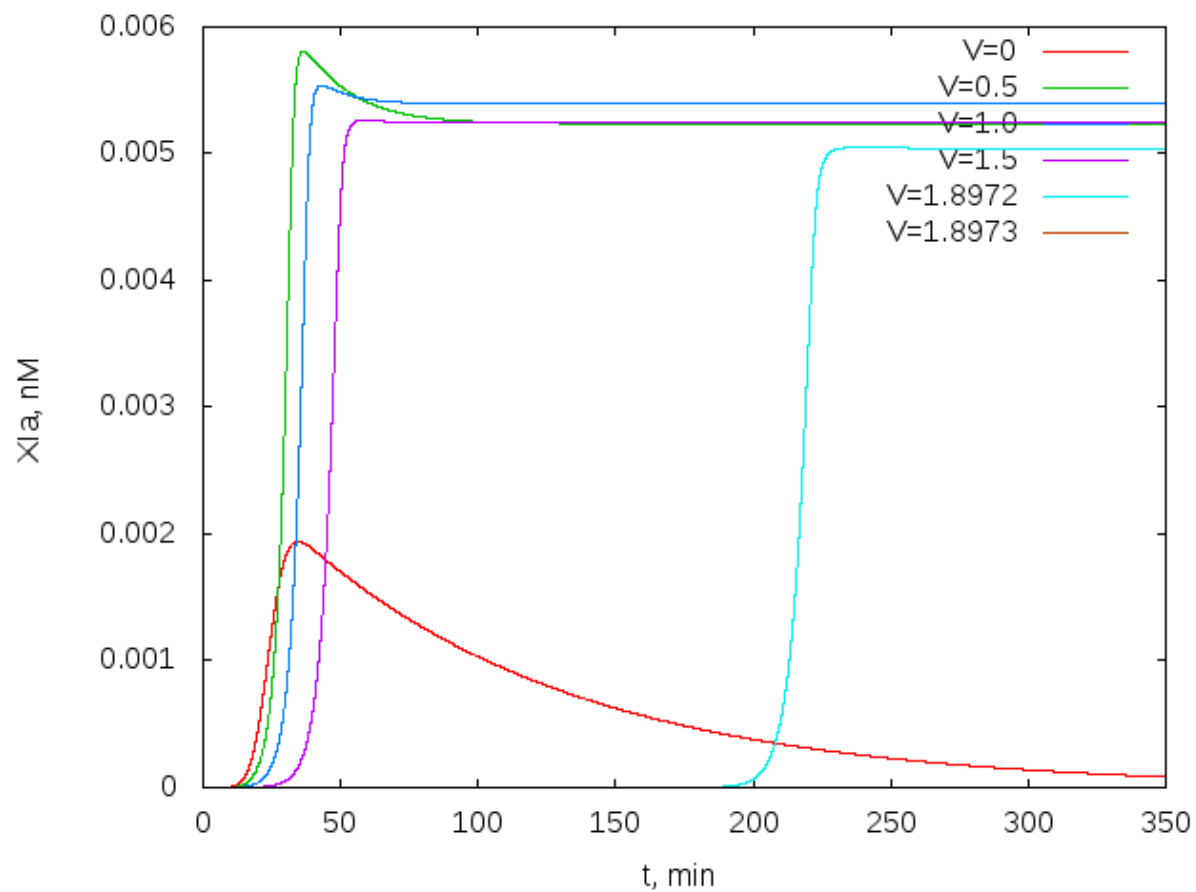
Динамика свертывания (тромбин)



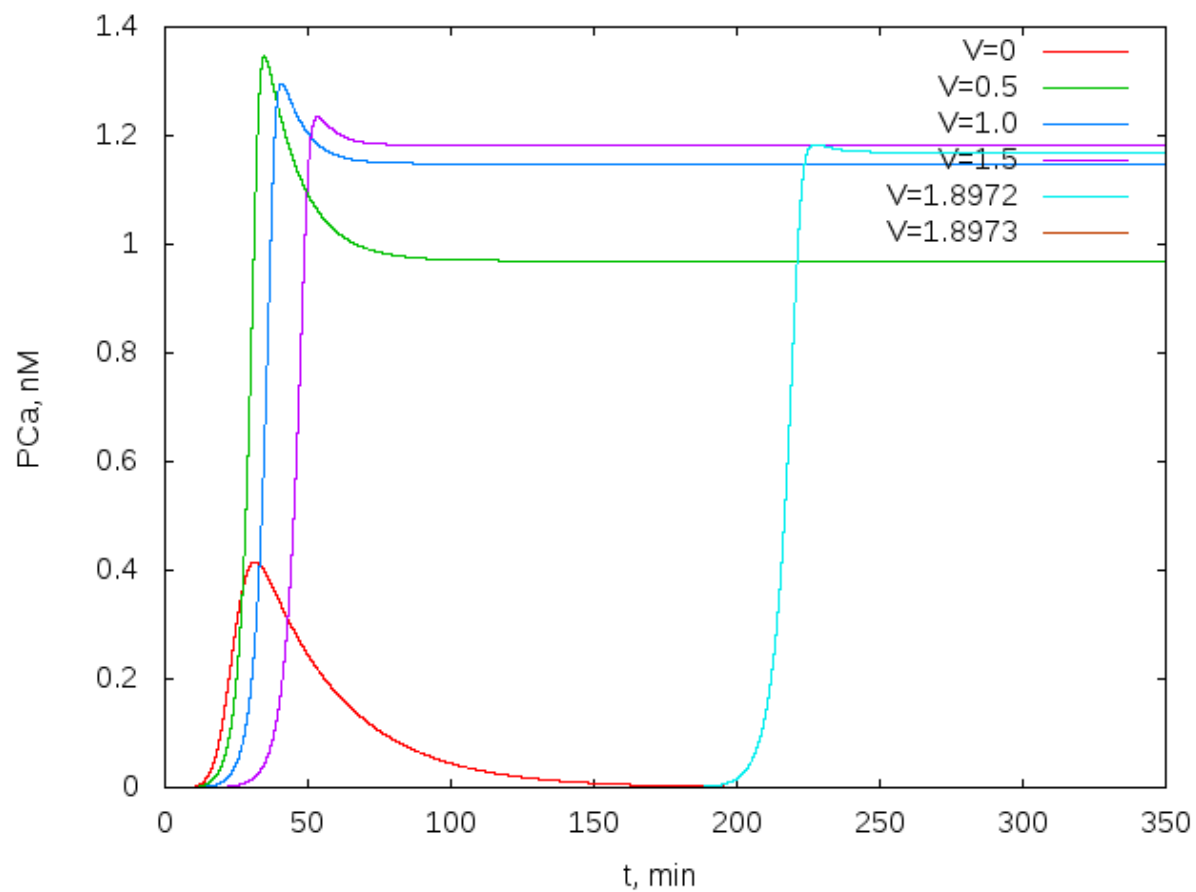
Динамика свертывания (FVa)



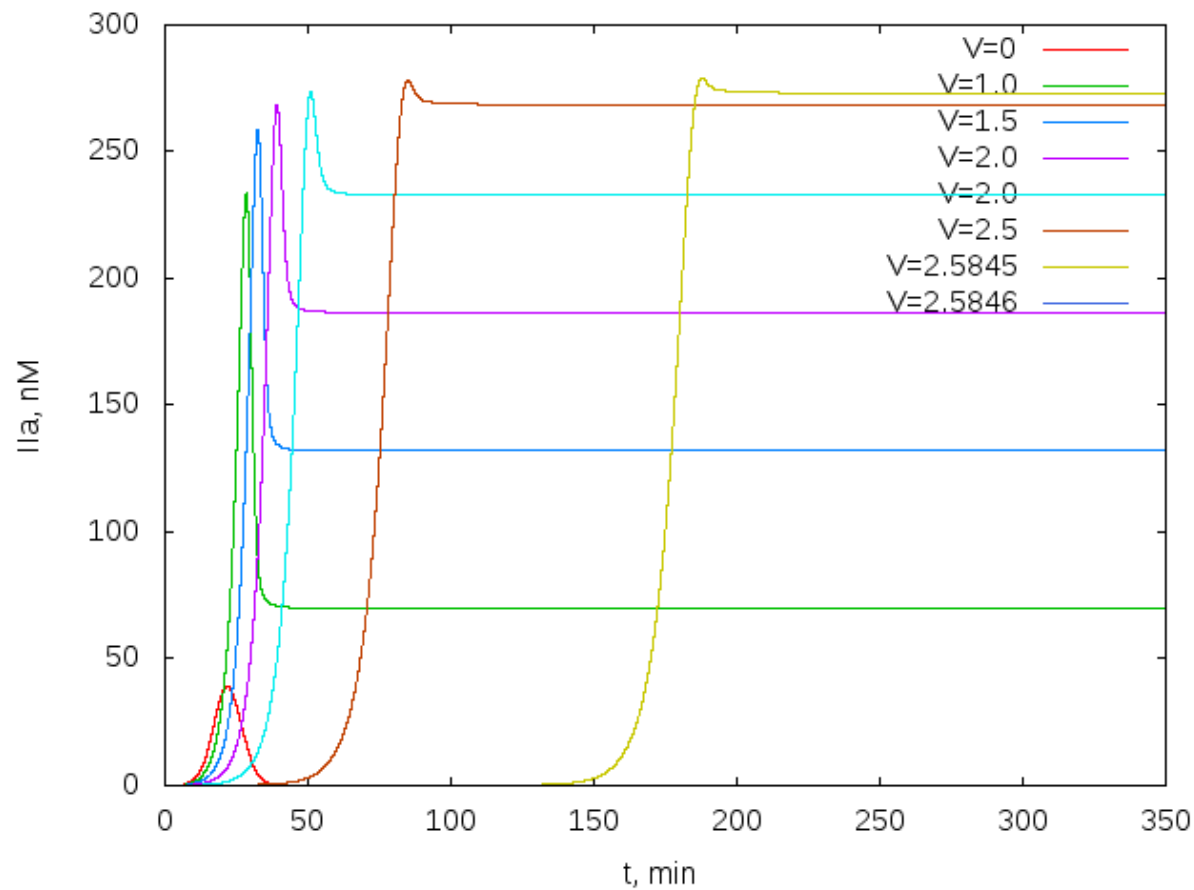
Динамика свертывания (FXIa)



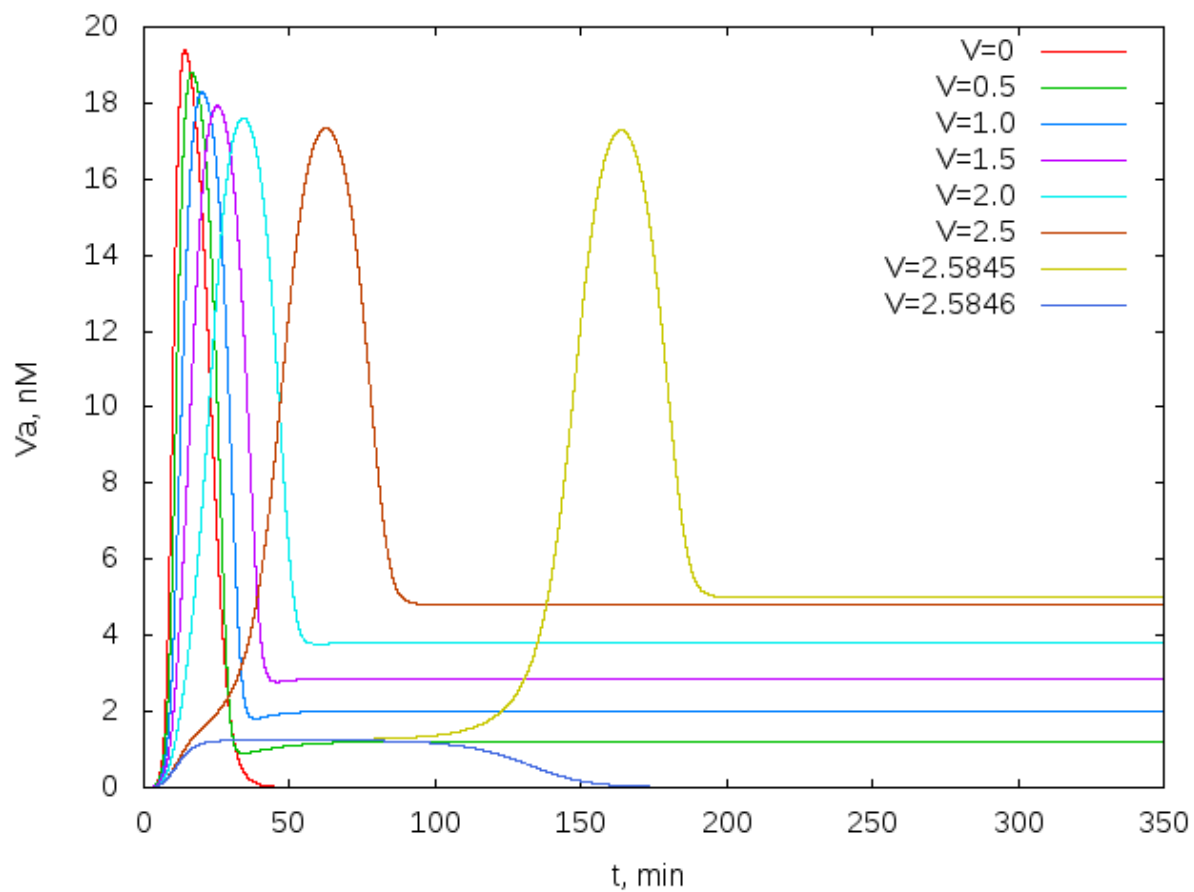
Динамика свертывания (PCa)



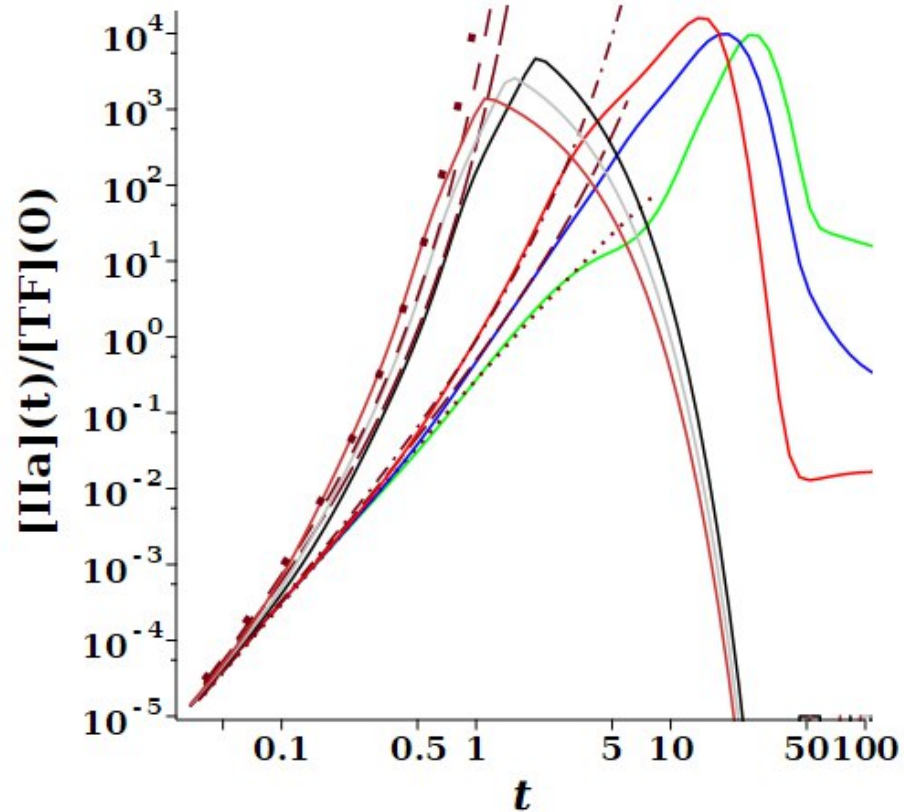
Динамика свертывания (тромбин) $F_d=3000$



Динамика свертывания (FVa)

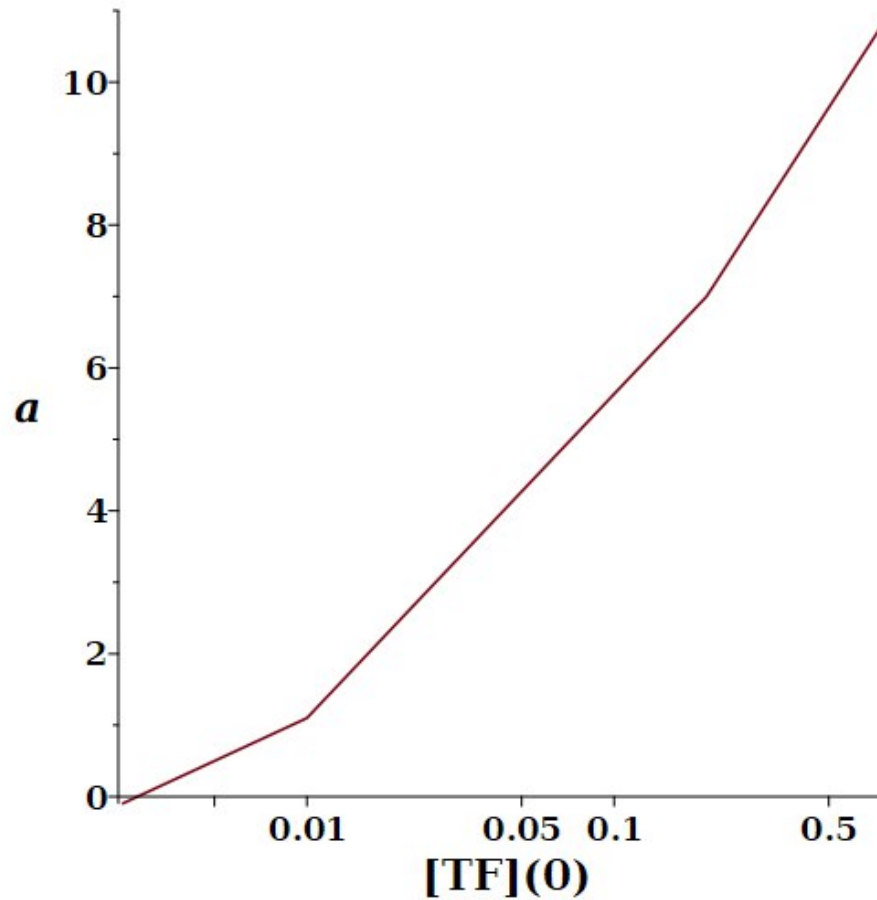


Нулевая скорость, зависимость от TF

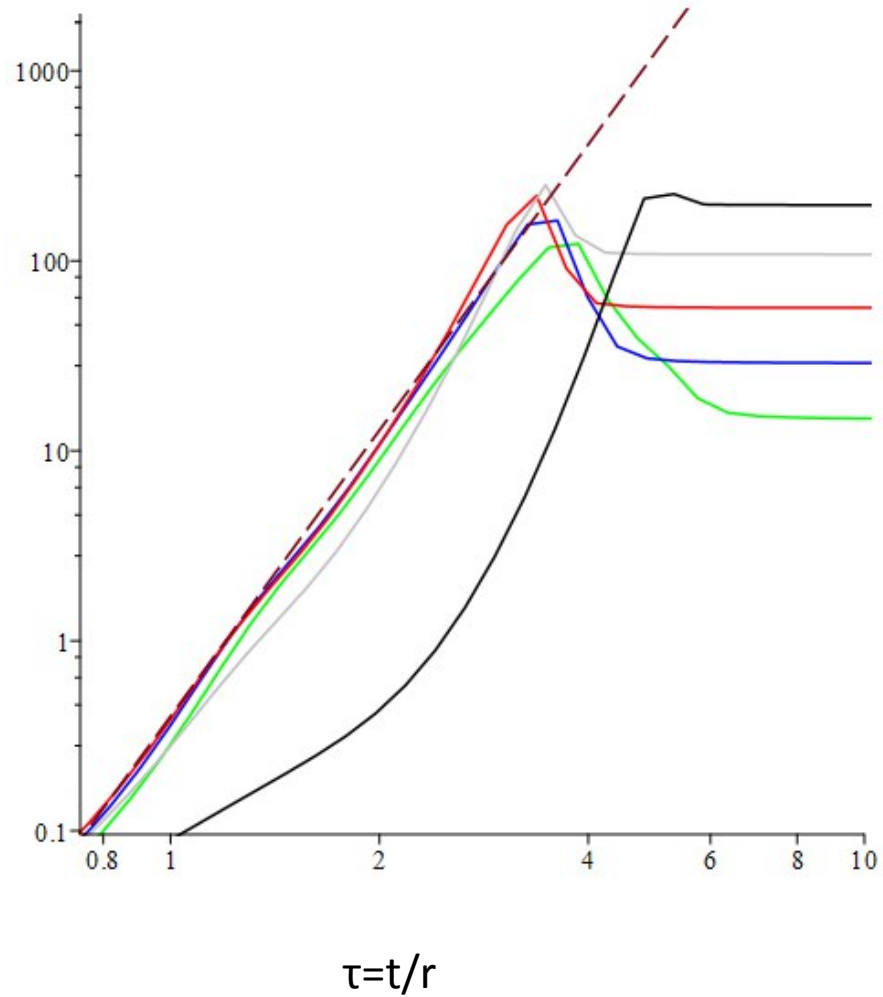


Пунктир Ct^3e^{at}

Нулевая скорость, зависимость от TF



Автомодельные зависимости



Основные выводы

- При уменьшении концентрации фибриногена верхнее пороговое значение скорости потока увеличивается
- В модели проточного реактора в широком диапазоне скоростей на этапе ускоренного роста производства тромбина сохраняются те же универсальные зависимости, что и в более простых постановках. Вблизи критического значения скорости эти зависимости нарушаются.