

# ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ



## Литература:

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии
2. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн.
3. Разинов А.И., Клинов А.В., Дьяконов Г.С. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие, 2017 , Казань
4. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии
5. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии
6. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн.; под ред. В.Г. Айнштейна.

## Лектор:

Клинов Александр Вячеславович

Семестр	Лекции	Лаб.занятия	Практика	Срс.
1	36	18	18	81
2	18	36	36	81
Всего	54	54	54	162

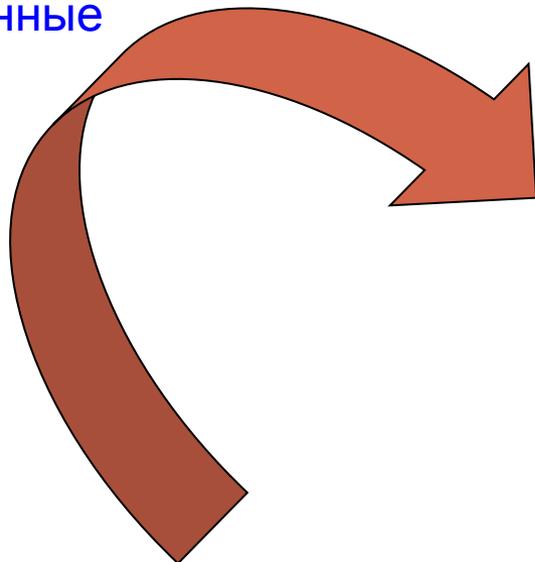
*Ученые исследуют то, что существует вокруг,  
инженеры создают то, чего никогда не было.*



Мы живем в мире созданном инженерами

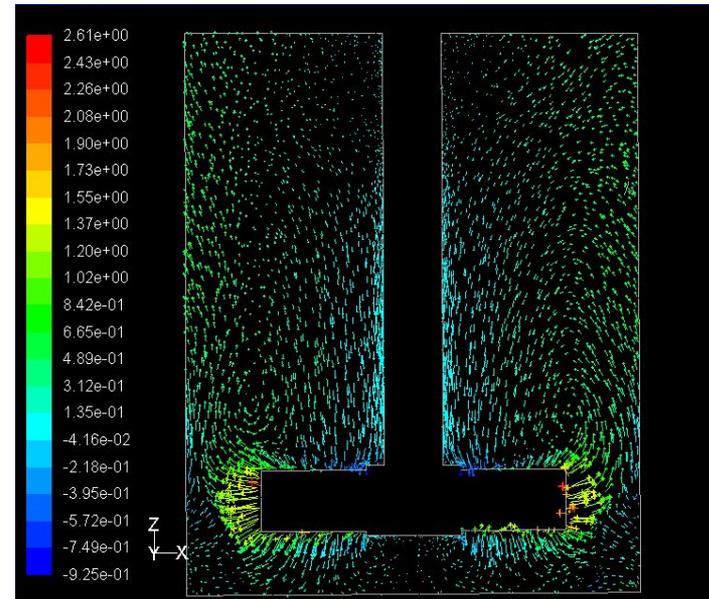
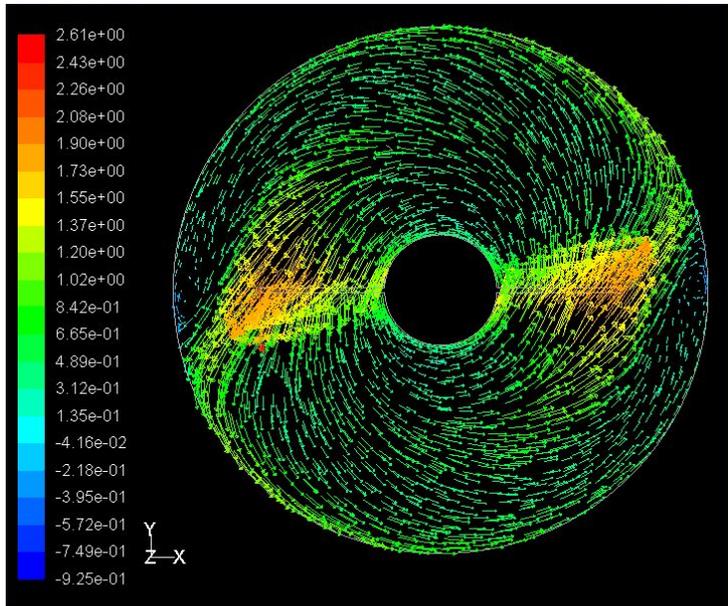
# ПАХТ (Chemical Engineering)

Перенос идей в  
промышленные  
технологии



Основная проблема – масштабный переход

# Проблема масштабного перехода



Неравномерность полей скоростей, концентраций и температур

$$C(\tau, x, y, z) \quad T(\tau, x, y, z) \quad v_k(\tau, x, y, z)$$

# Задачи



**1 Проектные** – требуется подобрать и рассчитать основные размеры аппарата по заданным характеристикам входных и выходных потоков

**2 Поверочные** – для заданного аппарата определенной конструкции и размеров определяют характеристики протекания процесса в зависимости от технологических и режимных параметров.

Необходимо выбрать оптимальный вариант решения задачи !

# ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАХТ



В Российской империи первопроходцем в этой области стал [Ф. А. Денисов](#), высказавший идею об общности процессов и аппаратов в различных химических производствах (1828 год).

Эта идея подтолкнула химика [Александра Крупского](#) к созданию новой учебной дисциплины (расчёт и проектирование основных процессов и аппаратов) в [Петербургском технологическом институте](#) в 1890-х, позднее такой же курс стал читать профессор [И. А. Тищенко](#) в [Московском Высшем техническом училище](#). Благодаря своей деятельности А. А. Крупский и И. А. Тищенко считаются основоположниками курса «Процессы и аппараты».

[Андрей Георгиевич Касаткин](#)

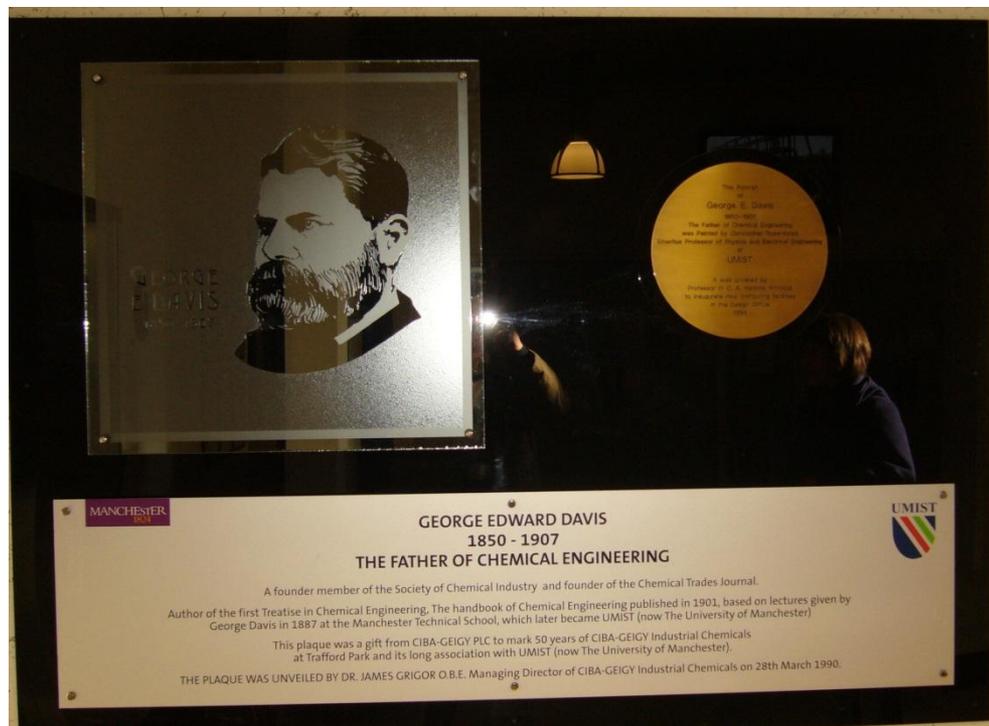
(25.08.1903 - 05.06.1963)

Автор книги «Основные процессы и аппараты химической технологии» (1935, 10-е издание 2004), переведенной на многие иностранные языки.

# ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАХТ

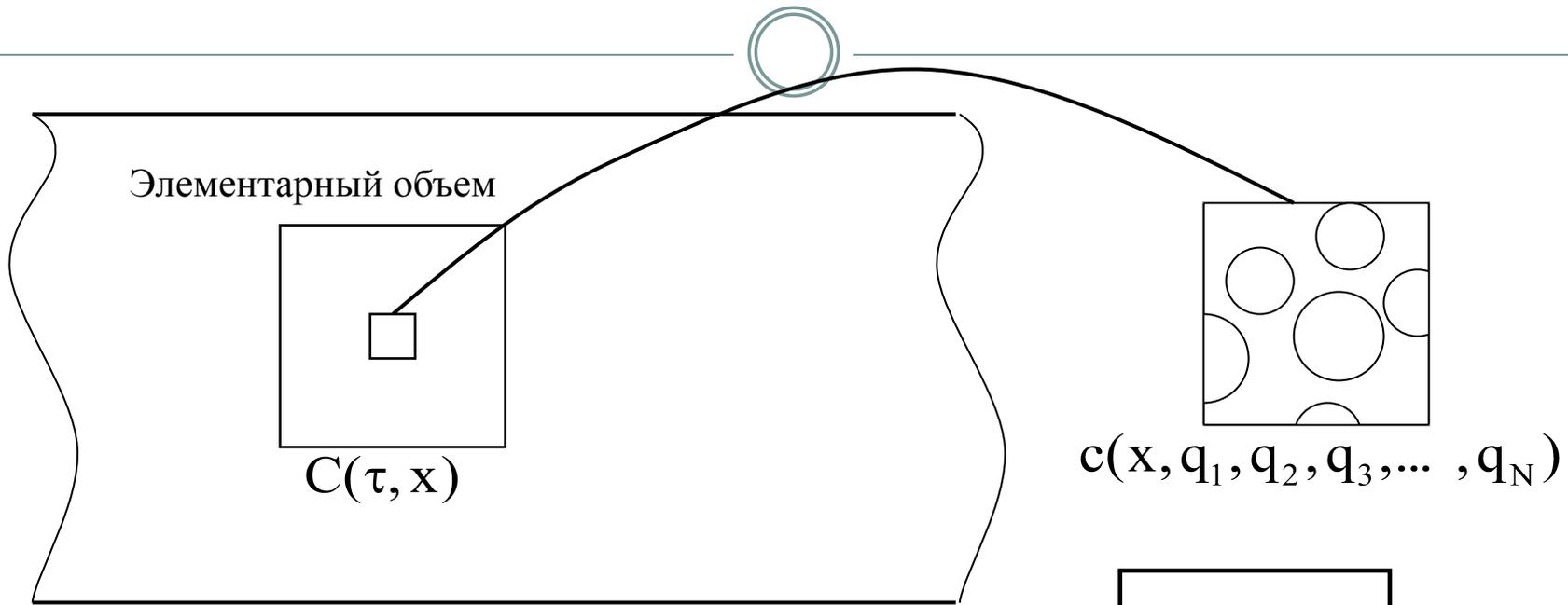


Техническая школа г. Манчестер (Англия) 1901г.



США в 1931 г. издан учебник В. Бержера и В. Лак-Кэба  
"Основные процессы и аппараты химических производств"

# Модель сплошности среды



$$C(\tau, x) = \langle c \rangle_\tau = \frac{1}{\Delta\tau} \int_0^{\Delta\tau} c(x, q(\tau)) d\tau$$

$10^{16}$	$M \neq 1$
$10^{19}$	

1 с  $10^9 - 10^{12}$  СТОЛКНОВЕНИЙ

# Система и параметры состояния



**Макроскопическая система** – любой материальный объект, состоящий из большого числа частиц (молекул).

Системы могут быть **гомогенными** и **гетерогенными**

**Состояние системы** задается макроскопическими **параметрами** (внутренними и внешними), например давление, объем, температура и т.д.

Число параметров необходимых для однозначного задания состояния системы определяется правилом фаз Гиббса:  $C = K - \Phi + 2$

Состояние системы может быть **равновесным** (параметры системы не меняются с течением времени и отсутствуют потоки субстанции) и **неравновесным**, а так же **стационарным** (параметры системы не меняются с течением времени) и **нестационарным**

# Процессы



Под **процессом** понимается последовательная смена состояний системы.

Для проведения процесса необходимо вывести систему из состояния равновесия, т.е. оказать на нее воздействие извне. При этом будет осуществляться перенос одного или нескольких видов субстанции: массы, импульса, энергии.

В зависимости от того, скорость переноса какого вида субстанции определяет скорость протекания процессов, изучаемых в данной дисциплине, они подразделяются на следующие:

- *гидромеханические* определяющиеся скоростью переноса импульса;
- *теплообменные*, определяющиеся скоростью переноса энергии;
- *массообменные*, определяющиеся скоростью переноса массы;
- *механические*;
- *химические реакции*

# Процессы



Процессы могут подразделяться не только по виду переносимой субстанции, определяющей скорость их протекания, но и по ряду других признаков. Различают **стационарные** процессы, в которых параметры (температура, давление, скорость и т.д.) для любой фиксированной точки пространства не меняются во времени, и **нестационарные**, в которых такие изменения происходят.

По способу организации процессов во времени их подразделяют на **периодические** и **непрерывные**. В периодических процессах, являющихся нестационарными, все стадии протекают в одном месте, но в различное время (загрузка, обработка, выгрузка). В непрерывных процессах, являющихся, как правило, стационарными, все стадии осуществляются одновременно, но разделены в пространстве.

# Основные процессы и аппараты



- *гидромеханические*  
определяющиеся скоростью переноса импульса;
  - *теплообменные*,  
определяющиеся скоростью переноса энергии;
  - *массообменные*,  
определяющиеся скоростью переноса массы;
  - *механические*;
  - *химические реакции*
- 
- *отстойники, фильтры, центрифуги, циклоны и т.д.;*
  - *теплообменники (кожухотрубные, спиральные пластинчатые и т.д.);*
  - *массообменные аппараты (абсорбера, экстракторы, ректификационные установки и т.д.)*
  - *мельницы, дробилки и т.д.*
  - *химические реактора*

# Теоретические основы химической технологии



1. Законы сохранения
2. Законы термодинамики
3. Явления переноса и химическая кинетика

# Законы термодинамики



Второе начало термодинамики

$$dU = \delta Q - PdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$$

$$\delta Q = TdS$$

соотношение Дюгема: Гиббса-

$$SdT - VdP + \sum_{i=1}^n N_i d\mu_i = 0$$

При  $P=\text{const}$  и  $T=\text{const}$

$$\sum_{i=1}^n N_i d\mu_i = 0 \quad \sum_{i=1}^n x_i \frac{\partial \mu_i}{\partial x_k} = 0$$

Термодинамические состояния

$$U(S, V, N)$$

$$F(V, T, N) = U - TS$$

$$G(P, T, N) = U - TS + PV$$

$$H(P, S, N) = U + PV$$

$$P = f(T, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$$

-внутренняя энергия;

- свободная энергия;

- энергия Гиббса;

- энтальпия;

Уравнение состояния

$$dF = SdT - PdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$$

$$dG = SdT + VdP + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$$

$$dH = TdS + VdP + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$$

# Условия равновесия



Однофазная система

Многофазная система

*Тепловое равновесие*

$$T = \text{const} \quad \vec{\nabla} T = 0$$

$$T' = T'' = T''' = \dots = T^{(\Phi)}$$

Механическое равновесие

$$P = \text{const} \quad \vec{\nabla} P = 0$$

;

$$P' = P'' = P''' = \dots = P^{(\Phi)}$$

*Концентрационное (химическое) равновесие*

$$\mu = \text{const} \quad \vec{\nabla} \mu_i = 0$$

$$\mu_1^{(\Phi)} = \mu_1'' = \mu_1''' = \dots = \mu_1^{(}$$

$$\mu_2^{(\Phi)} = \mu_2'' = \mu_2''' = \dots = \mu_2^{(}$$

.....

$$\vec{\nabla} = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad \vec{\nabla} a = i \frac{\partial a}{\partial x} + j \frac{\partial a}{\partial y} + k \frac{\partial a}{\partial z} \equiv \text{grada}$$

$$\mu_n^{(\Phi)} = \mu_n'' = \mu_n''' = \dots = \mu_n^{(}$$

# Химический потенциал



$$d\mu_i = v_i dP$$

Идеальный газ

$$PV = \sum_i N_i RT \quad v_i = \frac{RT}{P}$$

$$\mu_i(T, P) = \mu_i^0(T, P^0) + RT \ln\left(\frac{P}{P^0}\right)$$

$$\mu(T, P) = \mu^0(T, P^0) + RT \ln(P)$$

$$\mu_i(T, P) = \mu_i^0(T, P^0) + RT \ln(P_i)$$

$$P_i = P X_i$$

$$\mu_i(T, P) = \mu_i^0(T, P^0) + \int_{P^0}^P v_i dP$$

Реальный газ

$$PV = Z_V \sum_i N_i RT$$

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln\left(\frac{f_i}{f_i^0}\right)$$

$$f_i = \phi_i P X_i \quad P \rightarrow 0 \quad \phi_i \rightarrow 1$$

Условия фазового равновесия

$$\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta \rightarrow f_i^\alpha = f_i^\beta$$

Справедливо при любом выборе нулевого состояния

# Химический потенциал



Переменные  $P, T, x$

$$\ln(\phi_i) = \frac{1}{RT} \int_0^P \left( v_i - \frac{RT}{P} \right) dP$$

Чистый компонент

$$\ln(\phi) = \int_0^P \frac{Z_v - 1}{P} dP$$

Переменные  $V, T, x$

$$\ln(\phi_i) = \frac{1}{RT} \int_V^\infty \left[ \left. \frac{\partial P}{\partial N_i} \right|_{V, T, N_{j \neq i}} - \frac{RT}{V} \right] dV - \ln(Z_v)$$

Чистый компонент

$$\ln(\phi) = (Z_v - 1) + \int_V^\infty \frac{Z_v - 1}{V} dV - \ln(Z_v)$$

Для расчета фугитивности (коэффициента фугитивности) необходимо уравнение состояния

$$V = \mathfrak{Z}(T, P, N_1, N_2, \dots, N_n)$$

$$P = f(T, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$$

# Химический потенциал



**Table 2.4** Useful Equations of State

Name	Equation	Equation Constants and Functions
(1) Ideal-gas law	$P = \frac{RT}{v}$	None
(2) Generalized	$P = \frac{ZRT}{v}$	$Z = Z(P_r, T_r, Z_c \text{ or } \omega)$ as derived from data
(3) Redlich-Kwong (RK)	$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{(v^2 + bv)\sqrt{T}}$	$b = 0.08664RT_c/P_c$ $a = 0.42748R^2T_c^{2.5}/P_c$
(4) Soave-Redlich-Kwong (SRK)	$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + bv}$	$b = 0.08664RT_c/P_c$ $a = 0.42748R^2T_c^2[1 + f_\omega(1 - T_r^{0.5})]^2/P_c$ $f_\omega = 0.48 + 1.574\omega - 0.176\omega^2$
(5) Peng-Robinson (PR)	$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + 2bv - b^2}$	$b = 0.07780RT_c/P_c$ $a = 0.45724R^2T_c^2[1 + f_\omega(1 - T_r^{0.5})]^2/P_c$ $f_\omega = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$

# Химический потенциал



$$a_i = \frac{f_i}{f_i^0} = x_i \gamma_i \quad - \text{активность}$$

$$f_i = f_i^0 x_i \gamma_i$$

$f_i^0$  - Фугитивность стандартного состояния  
чистый компонент  $i$  при заданных  $T$  и  $P$   
бесконечное разбавление компонента  $i$  при заданных  $T$  и  $P$

$$\mu_i(T, P, x_i) = \mu_i^0(T, P) + RT \ln(x_i \gamma_i)$$

$$g^E(T, P, x_i) = g(T, P, x_i) - g^{id}(T, P, x_i) \quad - \text{Id идеальный раствор} \quad \gamma_i = 1$$

$$\ln(\gamma_i) = \frac{1}{RT} \left. \frac{\partial (N g^E)}{\partial N_i} \right|_{N_k, P, T}$$

$$x_1 = 1 \rightarrow \gamma_1 = 1, g^E = 0$$

$$x_2 = 1 \rightarrow \gamma_2 = 1, g^E = 0$$

# Химический потенциал



**Table 2.8** Empirical and Semitheoretical Equations for Correlating Liquid-Phase Activity Coefficients of Binary Pairs

Name	Equation for Species 1	Equation for Species 2
(1) Wilson (two-constant)	$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + x_2 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} \right)$	$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) - x_1 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} \right)$
(2) NRTL (three-constant)	$\ln \gamma_1 = \frac{x_2^2 \tau_{21} G_{21}^2}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} + \frac{x_1^2 \tau_{12} G_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2}$ $G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij})$	$\ln \gamma_2 = \frac{x_1^2 \tau_{12} G_{12}^2}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} + \frac{x_2^2 \tau_{21} G_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2}$ $G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij})$
(3) UNIQUAC (two-constant)	$\ln \gamma_1 = \ln \frac{\psi_1}{x_1} + \frac{Z}{2} q_1 \ln \frac{\theta_1}{\psi_1} + \psi_2 \left( l_1 - \frac{r_1 l_2}{r_2} \right) - q_1 \ln(\theta_1 + \theta_2 T_{21}) + \theta_2 q_1 \left( \frac{T_{21}}{\theta_1 + \theta_2 T_{21}} - \frac{T_{12}}{\theta_2 + \theta_1 T_{12}} \right)$	$\ln \gamma_2 = \ln \frac{\psi_2}{x_2} + \frac{Z}{2} q_2 \ln \frac{\theta_2}{\psi_2} + \psi_1 \left( l_2 - \frac{r_2 l_1}{r_1} \right) - q_2 \ln(\theta_2 + \theta_1 T_{12}) + \theta_1 q_2 \left( \frac{T_{12}}{\theta_2 + \theta_1 T_{12}} - \frac{T_{21}}{\theta_1 + \theta_2 T_{21}} \right)$