

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Математическое моделирование процесса  
теплопередачи в атмосферном газификаторе СПГ**

каф. КрТиТСПГ

Группа W4205, Наумов Ф.В.

Руководитель Зайцев Андрей Викторович,

к.т.н., доцент

[fyodornaumov@mail.ru](mailto:fyodornaumov@mail.ru)

Санкт-Петербург, 2019



## Цель:

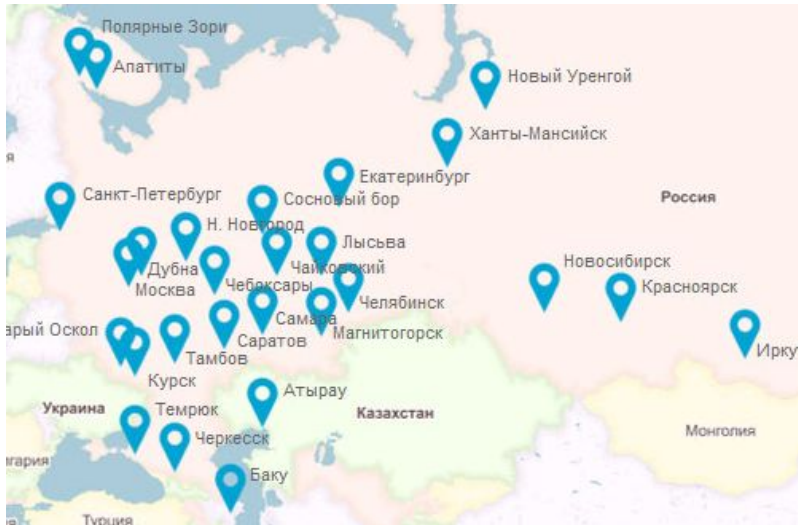
- Разработать математическую модель теплопередачи в атмосферном газификаторе СПГ

## Задачи:

- Расчет теплофизических свойств СПГ
- Определение термического сопротивления инеевого слоя
- Расчет коэффициента теплопередачи



## Атмосферный газификатор СПГ



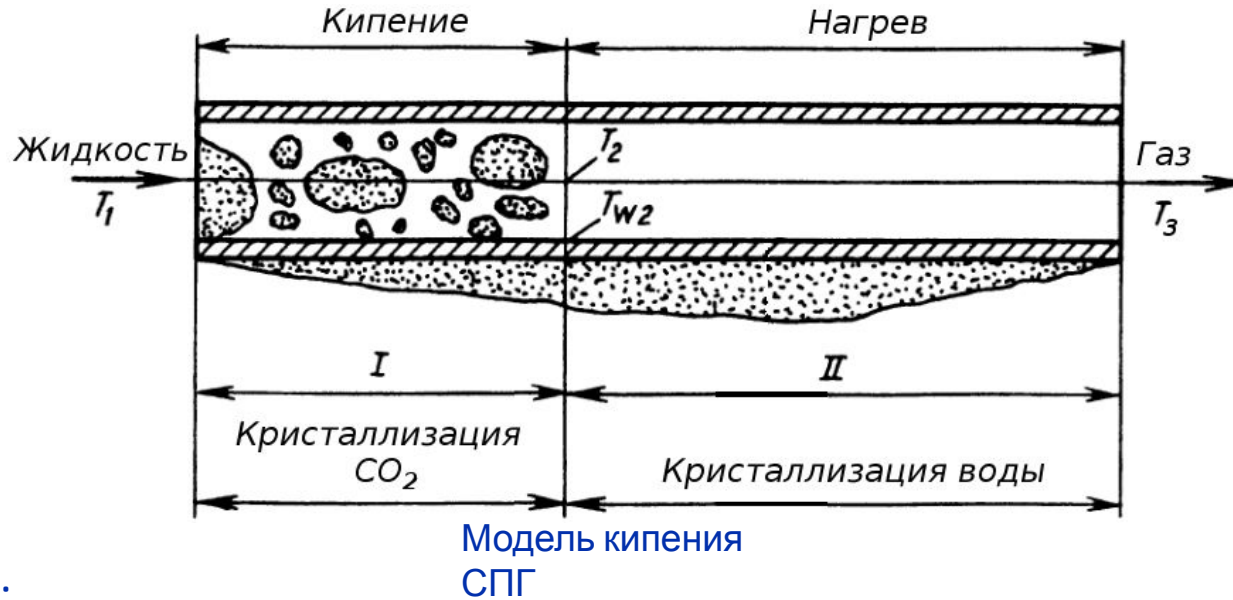
Продажа газификаторов компании “Криотехника”



Преимущества: простота и надежность конструкции, экологичность, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, дешевый теплоноситель.  
Недостатки: большая площадь, цикличность работы.  
Применение: установки средней и малой производительности.



## Цель, схема и допущения модели расчета



Цель расчета:

- площадь поверхности теплообмена
- компоновка газификатора

Основные допущения:

- квазистационарность режима теплопередачи через слой инея

Основные уравнения тепло- и массообмена:

- уравнения теплового баланса
- уравнения конвективного теплообмена с учетом лучистой составляющей



## Теплофизические свойства СПГ

По проведенному обзору зарубежной и отечественной литературы, расчеты термодинамических свойств и фазового равновесия природных газов предлагается производить на основе уравнения состояния GERG-2008 (В.Вагнер и др.). Уравнение GERG-2008 уже оформлено как проект стандарта ИСО (ISO 20765-2/3) для природных газов (газовой и жидкой фаз, парожидкостного равновесия) и обеспечивает наиболее точную (на текущий момент) оценку термодинамических свойств природных газов и других смесей, состоящих из компонентов природного газа (до 21-го компонента). Расчет возможен в очень широком диапазоне давлений (до 70 МПа) и температур (от 60 до 700 К). Уравнение записано как функция приведенной свободной энергии Гельмгольца от плотности, температуры и состава:

$$a(\delta, \tau, \bar{x}) = a^0(\rho, T, \bar{x}) + a^r(\delta, \tau, \bar{x}),$$

где  $a^0$  – часть свободной энергии для идеально-газовой смеси, а  $a^r$  – остаточная часть приведенной свободной энергии Гельмгольца.



## Термическое сопротивление инеевого слоя

Термическое сопротивление инея определяется как:

$$R_{\text{ин}} = \frac{\delta_{\text{ин}}}{\lambda_{\text{ин}}},$$

где 
$$\delta_{\text{ин}} = 0,00144(T_{\text{пов}}^{\text{кр.ос}} - T_{\text{ст}})^{0,4} \tau^{0,35} \left( \frac{p - p_{\text{пов}}^{\text{кр.ос}}}{p_{\text{возд}} - p_{\text{пов}}^{\text{кр.ос}}} \right)^{0,25}$$

( $p, p_{\text{пов}}^{\text{кр.ос}}, p_{\text{возд}}$  – парциальные давления паров воды в воздухе при температурах  $T_{\text{пов}}^{\text{кр.ос}} < T < T_{\text{ст}}$ ); а теплопроводность инея определяется из (Шаньшань Лю, Вэньлин Цзяо и др.):

$$\frac{1}{\lambda_{\text{ин}}} = \zeta \left[ (1 - \psi)\lambda_{\text{л}} + \frac{\psi}{\lambda_{\text{в}}} \right] + \frac{1 - \zeta}{(1 - \psi)\lambda_{\text{л}} + \psi\lambda_{\text{в}}}.$$

$\zeta$  – индекс плотности инея,  $\psi$  – пористость:

$$\zeta = 0,42[0,1 + 0,995(\{1 - \psi\}\rho_{\text{л}} + \psi\rho_{\text{в}})],$$

$$\psi = 1 - 0,71\exp[0,228(T_{\text{пов}} - 273,15)].$$

Индексом “пов” обозначаются параметры поверхности инея.



# Расчет коэффициентов теплоотдачи и

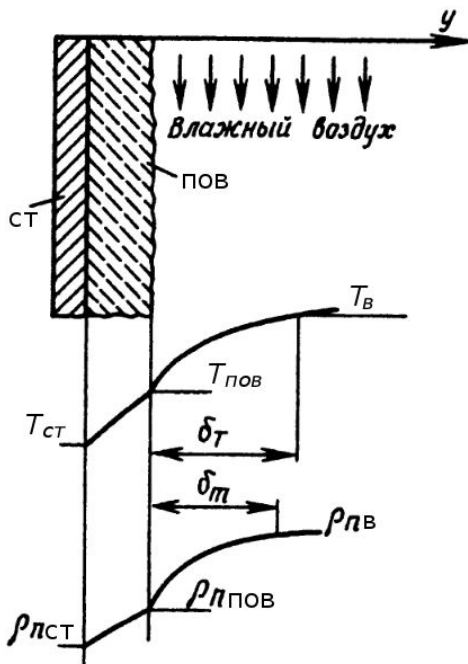
## теплопередачи

Расчетный критерий Нуссельта при свободном конвективном ламинарном

движении у профиля “звезда”

$\varphi = 0^\circ$	$Nu = 33;$	НОВКИ):
$\varphi = 30,6^\circ$	$Nu = 0,87 (Gr Pr)^{0,23};$	
$\varphi = 45^\circ$	$Nu = 0,107 (Gr Pr)^{0,356};$	
$\varphi = 90^\circ$	$Nu = 0,0265 (Gr Pr)^{0,432}.$	

В качестве определяющего размера в критерии Gr принят диаметр трубы по вершинам ребер.



Параметр ребра

$$m = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha\varepsilon + \alpha_{\text{луч}}} + \frac{\delta_{\text{ин}}}{\lambda_{\text{ин}}}\right) \delta_p \lambda_p}}$$

Коэффициент теплопередачи

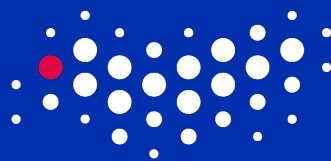
$$k = \left[ \frac{1}{\alpha_1 \eta_1} \frac{F_2}{F_1} + \frac{\delta_{\text{ин}}}{\lambda_{\text{ин}}} \frac{F_2}{F_{\text{ин}}} + \frac{1}{\alpha_2 \eta_2} \right]^{-1}$$



## Заключение

Выбраны схема, способ расчета свойств СПГ и ПГ, а также основные соотношения теплопередачи для составления математической модели процесса газификации в атмосферном испарителе СПГ в условиях образования инея





УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**

[en.ifmo.ru](http://en.ifmo.ru)

[international@mail.ifmo.ru](mailto:international@mail.ifmo.ru)

Санкт-Петербург, 2019