



II Международная научно-практическая конференция  
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХОЛАЖИВАНИЯ ДЛИННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Лопатин Артем Юрьевич

artem012316@gmail.com

16-18 сентября 2020 г  
Воронеж, Россия





# Введение

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Испытания жидкостных ракетных двигателей - это всесторонняя проверка, которой подвергаются аппаратура, узлы и системы двигателя для установления соответствия их характеристик предъявляемым тактико-техническим требованиям. Испытания ЖРД представляют собой сложную и многоплановую систему мероприятий, позволяющих получить достоверную информацию о работе всех компонент ЖРД и принять обоснованное решение о его установке в ракету-носитель. В отличие от других узлов или систем ракеты-носителя испытаниям ЖРД присущи некоторые особенности, связанные как со спецификой протекающих в них процессов, так и с условиями эксплуатации.

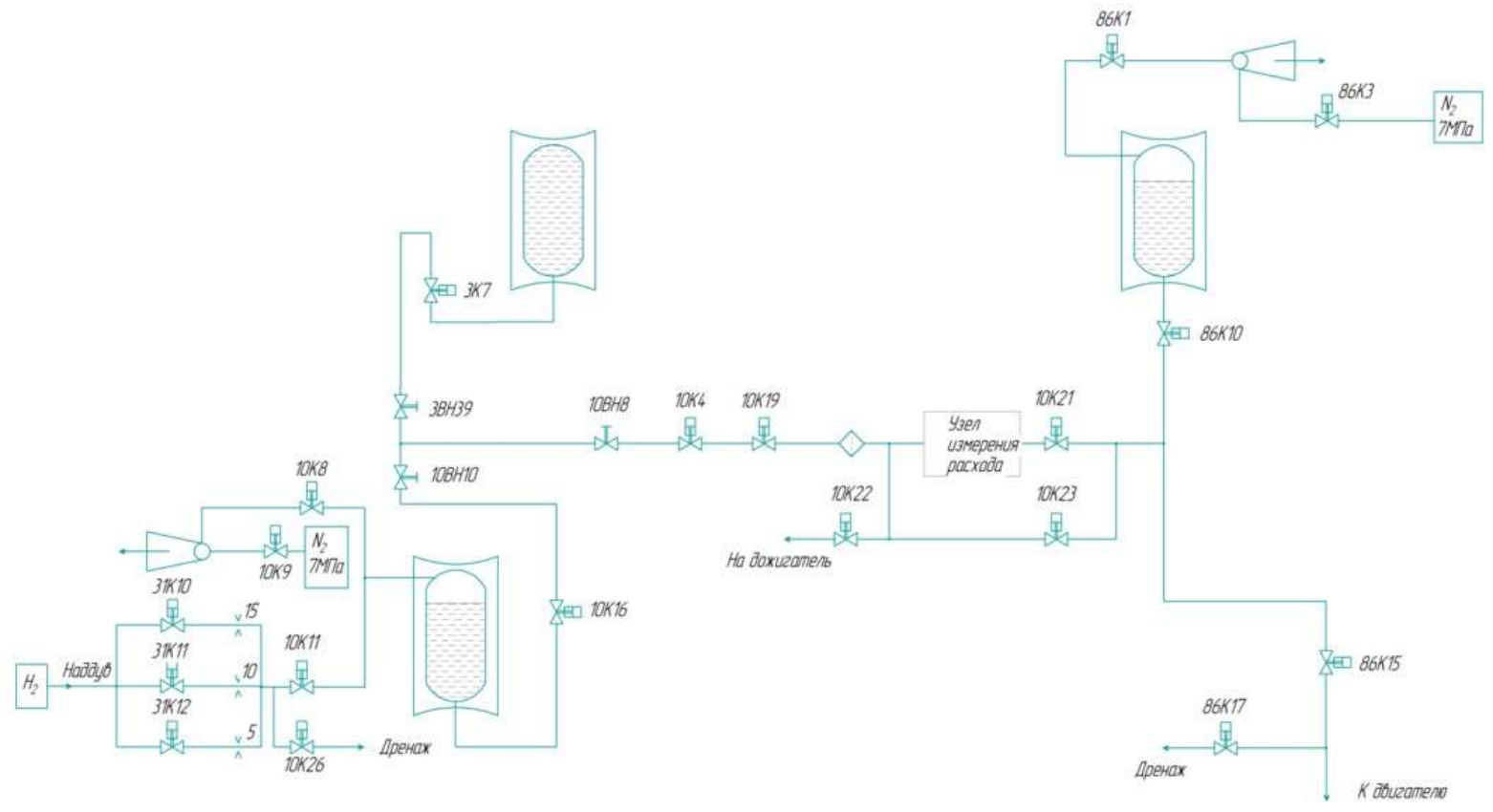
Наиболее важной особенностью, существенно ограничивающей число возможных испытаний, является их высокая стоимость, связанная в значительной мере с большими затратами топливных компонент и уникальностью используемого оборудования. В этой связи возникает необходимость их высокой информативности, рационального планирования и возможной минимизации как общего числа испытаний, так и потерь топлива в каждом испытании. Для решения указанной проблемы необходимо отработать оптимальные режимы протекания специальных трудноуправляемых технологических процессов, к которым, в частности, относится процесс подготовки стендовой системы к проведению испытания. Однако выполнение таких процессов при разных начальных условиях с целью набрать статистику и выработать наиболее оптимальный режим является не только весьма затратной, но трудно реализуемой задачей. Поэтому единственно правильным решением становится проведение моделирования реально протекающих в системе физических процессов.

**Цель работы:** разработка математической модели, описывающей физические процессы, протекающие при захолаживании длинных трубопроводов жидким водородом.



# Принципиальная схема подачи горючего на испытательный стенд

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»





# Система уравнений описывающая процесс захлаживания однофазным потоком

- уравнение неразрывности потока

- уравнение движения 
$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0; \tag{1}$$

$$-\frac{\partial R}{\partial z} - \frac{4\sigma}{d_{BH}} = \rho \frac{\partial W}{\partial \tau} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z}; \tag{2}$$

-уравнение энергии

$$\rho \frac{\partial i}{\partial \tau} + \rho W \frac{\partial i}{\partial z} = \frac{4q}{d_{BH}}; \tag{3}$$

- уравнения теплопроводности для стенок трубы

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_w}{\partial R} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right); \tag{4}$$

$$\lambda_w \frac{\partial T_w(R_{BH} \tau)}{\partial R} = q_{BH} = a(T_w(R_{BH} \tau) - T); \tag{5}$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w(R_{внеш} \tau)}{\partial R} = q_{внеш}; \tag{6}$$



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Система уравнений описывающая процесс захлаживания парожидкостной смесью

При описании процесса охлаждения тонкостенных изолированных магистралей потоком криогенной жидкости с частичным или полным испарением сохраняется форма записи уравнения теплопроводности для стенок трубы (4) – (6), но изменяются уравнения неразрывности (7), движения (8) и энергии для потока (9) в связи с образованием парожидкостной смеси

- уравнение неразрывности потока

$$\frac{\partial}{\partial \tau} ((1 - \varphi)\rho_{ж} + \varphi\rho_{г}) + \frac{\partial}{\partial z} ((1 - \varphi)\rho_{ж}W_{ж} + \varphi\rho_{г}W_{г}) = 0; \quad (7)$$

- уравнение движения

$$g((1 - \varphi)\rho_{ж} + \varphi\rho_{г}) - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{4\sigma}{D} = (1 - \varphi)\rho_{ж} \frac{\partial W_{ж}}{\partial \tau} + \varphi\rho_{г} \frac{\partial W_{г}}{\partial \tau} + (1 - \varphi)\rho_{ж}W_{ж} \frac{\partial W_{ж}}{\partial \tau} + \varphi\rho_{г}W_{г} \frac{\partial W_{г}}{\partial \tau} + (W_{г} - W_{ж}) \left( \frac{\partial}{\partial \tau} (\varphi\rho_{г}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varphi\rho_{г})W_{г} \right); \quad (8)$$

-уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial \tau} ((1 - \varphi)\rho_{ж}i_{ж} + \varphi\rho_{г}i_{г}) + \frac{\partial}{\partial z} ((1 - \varphi)\rho_{ж}i_{ж}W_{ж} - \varphi\rho_{г}i_{г}W_{г}) = \frac{4q}{d_{вн}}; \quad (9)$$

где  $\varphi$  - объемное паросодержание потока (на участке испарения  $0 < \varphi < 1$ , на участке газового течения  $\varphi = 1$ );

$q$  – плотность теплового потока на внутренней поверхности трубы;

$\sigma$  - касательное напряжение на стенке.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Расчетная система уравнений

С учетом допущений система уравнений (1-6) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{4\alpha(T_w - T)}{\rho_r c_{pr} d_{BH}}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} + \frac{\alpha(T_w - T)}{\rho_w c_{pw} \delta} = 0. \quad (11)$$

Входящий в систему коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\delta r}}{d_{BH}} Nu. \quad (12)$$

где число Нуссельта с учетом гомогенной модели потока

$$Nu = 0,0065 Re^{0,8} \left( \frac{c_{pr} \cdot (T_0 - T_{BX})}{r} \right)^{-1/6}. \quad (13)$$

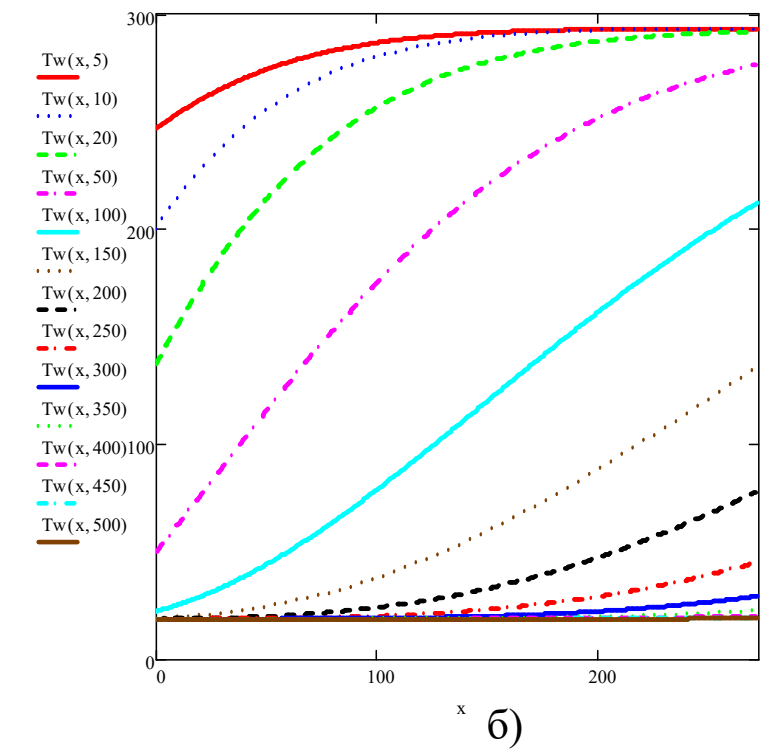
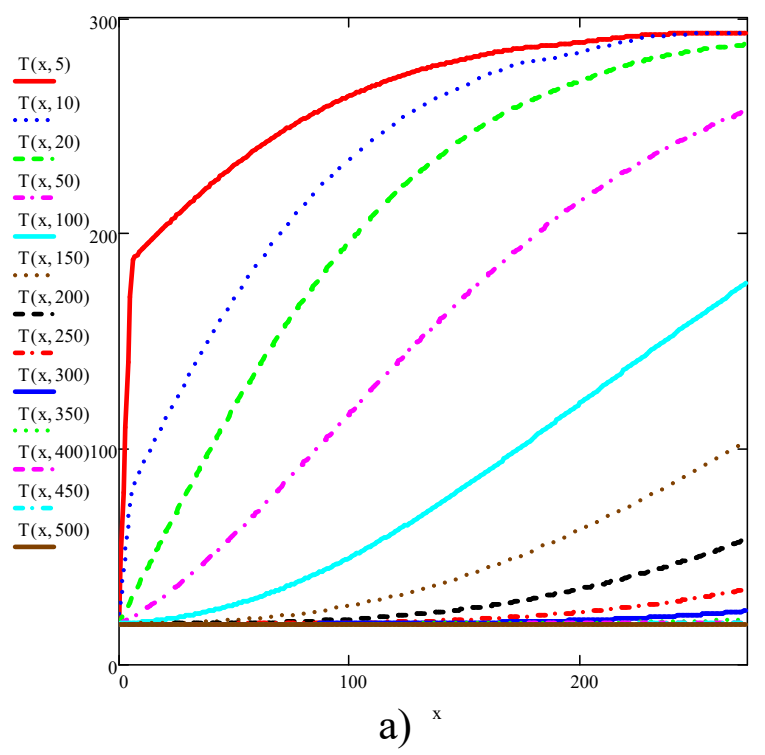
Используя полученные в результате решения системы функциональные зависимости, построенные для различных моментов времени, могут быть использованы для вычисления текущего значения средней температуры стенки (15) и построения кривых изменения средней температуры  $T_{ws}(\tau)$  и теплового ресурса стенок  $Q_w(\tau)$  в любом сечении при различных начальных условиях (16)

$$T_{ws} = \frac{1}{L_{3ax}} \int_0^{L_{3ax}} T_w(z) dz, \quad (14)$$

$$Q_w(\tau) = (T_{ws}(\tau) - T) c_{pw}(T_{ws}) \rho_w \delta. \quad (15)$$



# Результаты и обсуждение



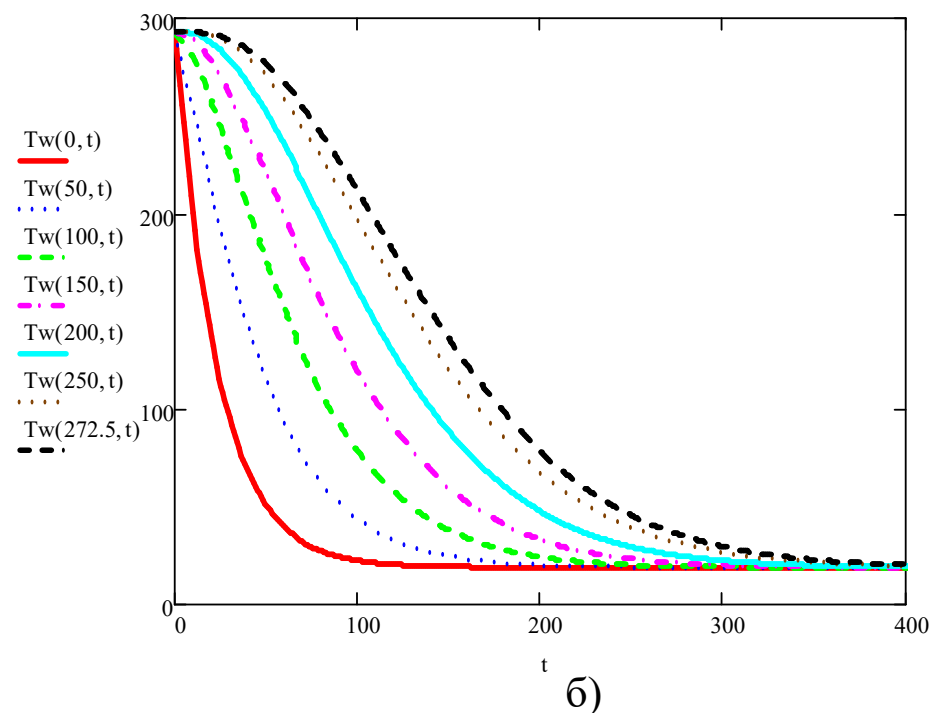
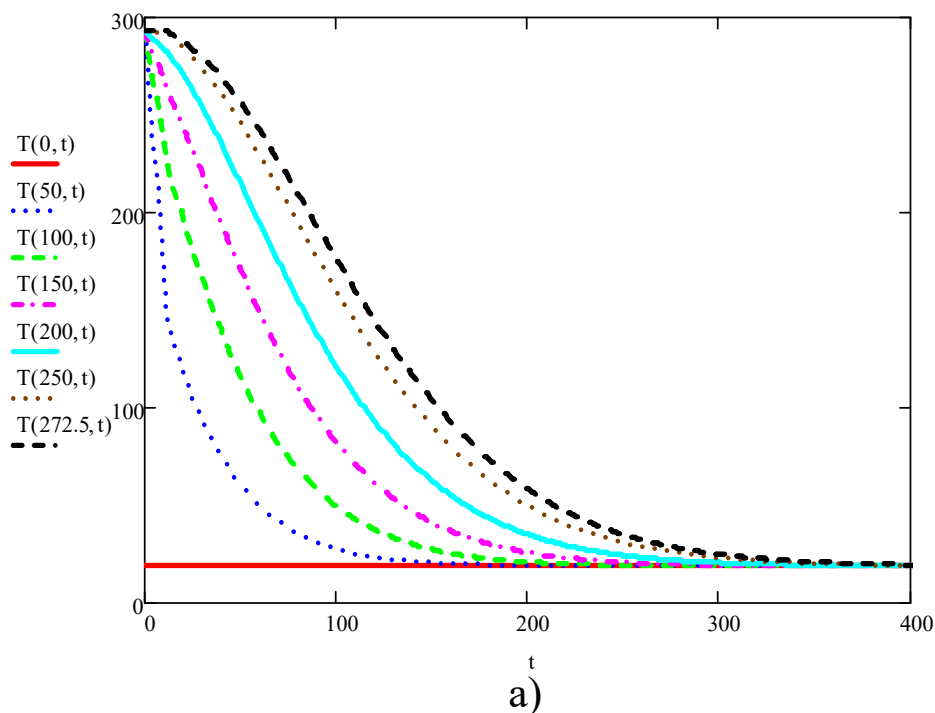
Распределение температуры потока (а) и стенки (б) по длине трубопровода в различные моменты времени



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Результаты и обсуждение

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХОЛАЖИВАНИЯ ДЛИННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОГО ВОДОРОДА



Временная зависимость средней температуры потока (а) и стенки (б) в различных сечениях трубопровода

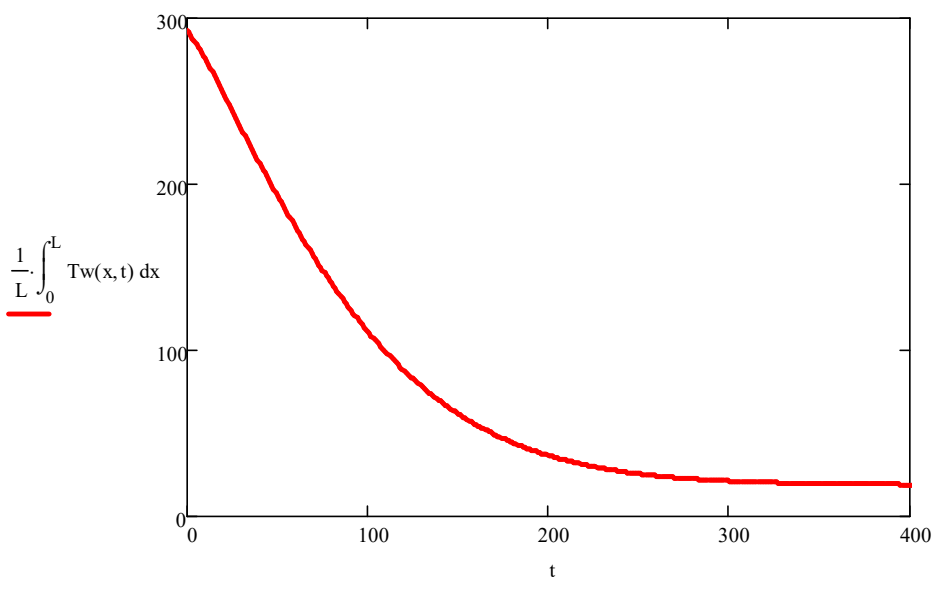




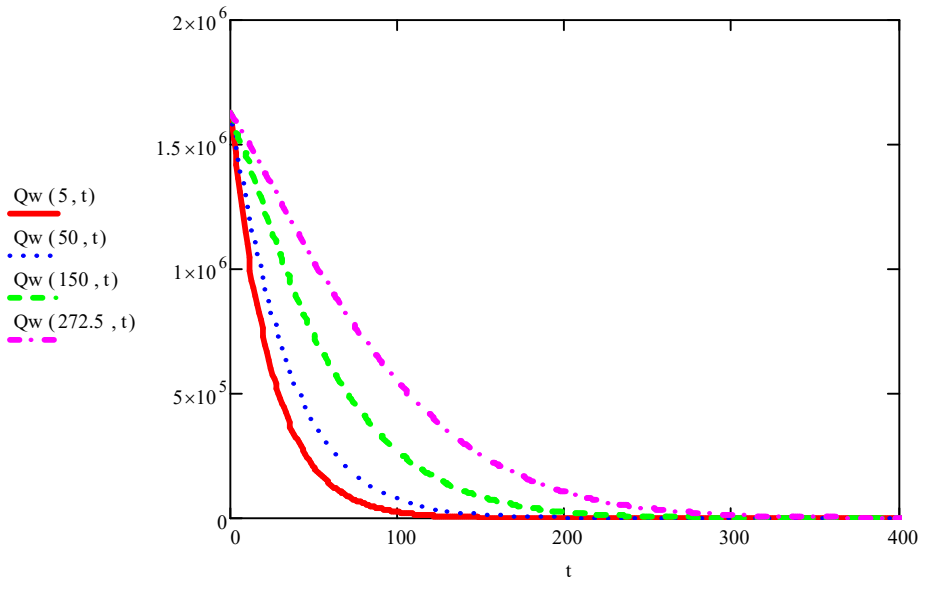
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХОЛАЖИВАНИЯ ДЛИННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

# Результаты и обсуждение



а)



б)

Временная зависимость средней температуры стенки (а) и теплового ресурса стенки для различных участков трубопровода (б)



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Выводы

Таким образом, была предложена математическая модель захлаживания длинных трубопроводов криогенными компонентами при подготовке стендовых систем к огневым испытаниям. На основе этой модели был создан автоматизированный алгоритм расчета, позволяющий получать данные для построения температурных полей стенок трубопровода и потока транспортируемого криопродукта в различные моменты времени, а также определять время выхода магистрали в рабочий режим и момент наступления стационарного течения однофазного потока. Используя данную модель при различных начальных и граничных условиях, можно отработать оптимальный режим протекания реальных физических процессов при подготовке стендовых систем к огневым испытаниям и добиться минимальных потерь криогенных компонент при минимальных временных затратах.



**Спасибо за внимание**