

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ПРОДЛЕНИЯ НАВИГАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Грамузов Е.М.,¹ Москвичева Ю.А.¹, Зуева Е.В.¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия (603600, г. Н. Новгород, ул. Минина, 24, корпус 5) e-mail: ship@nntu.nnov.ru

Как показали исследования последних лет, ледокольные суда и платформы на воздушной подушке являются эффективным средством разрушения ледяного покрова и продления навигации как в Арктических районах, так и на внутренних водных путях. В статье рассматривается решение двух взаимосвязанных задач. Первая связана с решением вопросов приоритетного проектирования ледокольных платформ на воздушной подушке, где рассматривалась экстремальная задача приоритетного направления. Во второй приводится технико-экономический анализ использования новых и существующих традиционных средств разрушения льда, и продления навигации. Приводится пример решения задач для конкретного случая. За критерии эффективности приняты минимум энергетических затрат и минимальная стоимость работ по прокладке ледового канала.

Ключевые слова: ледяной покров, Арктический шельф, разрушение ледяного покрова, ледокольные платформы на воздушной подушке, технико-экономическое обоснование

THE TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF DESTRUCTION OF THE ICE COVER AND EXTENSION OF NAVIGATION WITH USE OF TECHNOLOGIES ON THE AIRBAG

Gramuzov E.M.¹, Moskvicheva Y.A.¹, Zueva E.V.¹

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603600, Nizhny Novgorod, street Minina, 24/5) e-mail: ship@nntu.nnov.ru

As showed researches of the last years icebreaking vessels and platforms on the airbag are an effective remedy of destruction of an ice cover and extension of navigation both in the Arctic areas, and on the inland waterways. The article deals with the solution of two interrelated problems. The first relates to the decision of questions of priority design of icebreaking platforms on the airbag, which is considered extreme priority task of designing. The second is carried out technical and economic analysis of new and existing traditional means of breaking the ice and extend the navigation. An example of solving a particular case. For criteria of efficiency adopted minimum energy consumption and minimum cost of the work on laying the ice channel.

Keywords: ice cover, Arctic shelf, the destruction of the ice cover, ice-breaking platform hovercraft, a feasibility study

Географическое расположение России в северных широтах, расширение работ на шельфе Арктических морей, продление навигации на внутренних водных путях, обеспечение безопасности плавания в ледовых условиях предопределяют широкое использование ледоколов, других средств разрушения ледяного покрова и создания ледового канала.

Несмотря на то, что ледоколы являются универсальным средством, имеется ряд задач, которые можно успешно решать другими технологиями. Одним из них являются ледокольные платформы на воздушной подушке (ЛПВП). Такие суда (чаще всего, несамоходные) имеют низкие энергетические затраты при разрушении льда и небольшую строительную стоимость и эксплуатационные затраты. Они могут работать в счале с буксирными и транспортными судами, небольшими ледоколами, разрушая ледяной покров толщиной до 1,5 м со скоростью до 10 – 12 км/ч. ЛПВП могут использоваться для прокладки

ледовых каналов, околки судов, разрушения льда в акваториях заводов, портов, для вывода судов из ледового плена [1,3].

ЛПВП могут работать в качестве парама в период ледостава и ледохода, площадок для перевозки тяжеловесов и т.п. [3].

ЛПВП должна существенно отличаться от судов и платформ на воздушной подушке повышенным давлением в воздушной подушке (ВП), величина которого зависит от толщины разрушаемого льда, небольшим расходом воздуха из ВП, высотой гибкого ограждения (ГО), для преодоления неровностей льда и торосов, рядом дополнительных систем и устройств.

Работы по разрушению ледяного покрова и созданию ледового канала складываются из трех составляющих:

- Проектирование и постройка ЛПВП;
- Эксплуатация ЛПВП;
- Эксплуатация существующих буксиров и ледоколов, транспортных судов, работающих в сале с ЛПВП (толкающих ЛПВП перед собой).

В статье обсуждаются два аспекта рассматриваемой проблемы:

- Внутренняя задача приоритетного проектирования ЛПВП;
- Внешняя задача, в которой рассматриваются сценарии прокладки ледового канала с использованием одного ледокола, ЛПВП и ледокола, ЛПВП и буксира.

Эффективность использования ЛПВП заключается в том, что ледокол затрачивает большую энергию на разрушение сплошного ледяного покрова и на сопротивление в созданных обломках льда. ЛПВП перед ледоколом или буксиром разрушает ледяное поле с небольшими затратами энергии [4] и уменьшает сплоченность льда в канале, в котором движется толкающее судно.

Задача проектирования ЛПВП по существу – экстремальная задача математического программирования, в которой при векторе $\bar{C} (C_1, C_2 \dots C_n)$ параметров технического задания, необходимо определить вектор искомых величин $\bar{X} (X_1, X_2 \dots X_n)$, чтобы требования к какому-либо качеству, выражаемому функционалом A_j , а само качество судна определяется функционалом $G_j(\bar{X}, \bar{C})$, $[G_j(\bar{X}, \bar{C}) \geq A_j]$, а так же при ограничениях вида $X_i^{min} \leq X_i \leq X_i^{max}$, целевая функция достигала экстремального значения [5].

При решении оптимизационной задачи проектирования ЛПВП для прокладки ледового канала во льдах заданной толщины h , условной длиной l для проводки транспортных судов, ширина корпуса которых B , можно записать

$\bar{C}(h, B, l)$ – исходные параметры,

$\bar{X}(L, H, h_{го}, D, N_1, N_2)$ – вектор искомых характеристик;

$$\sum N_i \rightarrow \min,$$

$$\sum C_i \rightarrow \min, \quad \text{функции цели}$$

где: L, H – длина и ширина ЛПВП;

$h_{го}$ – высота гибкого ограждения;

D – водоизмещение судна;

N_1 – мощность на разрушение льда;

N_2 – буксировочная мощность при прокладке ледового канала.

В качестве функционалов используются:

- Уравнение масс

$$\sum m_i = D \quad (1)$$

- Давление в ВП - $P_{ВП}$, необходимое для разрушения ледяного покрова заданной толщины h , [1]

$$P_{ВП} = \frac{K_p h^2}{r^2} \left(1 + \frac{r^2}{S_{ВП} K(L/B)} \right), \text{ кПа} \quad (2)$$

где: $K_p = 1300 \pm 100$ кПа – удельная энергия разрушения ледяного покрова при

движении ЛПВП в канале;

$S_{ВП}$ – площадь ВП, м²;

L/B – отношение длины к ширине ВП;

r – характерный линейный размер при изгибе ледяной пластины:

$$r = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1 - \mu^2) \rho_B g}}, \text{ м}$$

E, μ – модуль упругости, кПа и коэффициент Пуассона для льда;

ρ_B – плотность воды, т/м³.

- Расход воздуха из воздушной подушки $Q_{вп}$, м³/с

$$Q_{ВП} = P_{ВП} h_э \sqrt{\frac{2P_{ВП}}{\rho_{возд}}}, \quad (3)$$

где: $P_{ВП}$ – периметр ВП, м;

$h_э = 0,0075$ м – эффективный воздушный зазор;

$\rho_{возд}$ – плотность воздуха, т/м³

- Мощность привода нагнетателя для создания ВП и разрушения льда: N_1 , кВт

$$N_1 = \frac{(P_{ВП} + \Delta P) Q_{ВП}}{\eta} \quad (4)$$

где: η – КПД вентилятора;

ΔP – потери давления в воздуховоде ($\Delta P \approx 0,2 P_{вн}$)

При движении ЛПВП с заданной скоростью v , необходимо учесть буксировочную мощность N_2 , зависящую от буксировочного сопротивления:

$$N_2 = Rv, \quad \text{кВт} \quad (5)$$

- Буксировочное сопротивление можно представить следующим образом:

$$R = R_p + R_B \quad (6)$$

В (6) не учтено импульсное, брызговое сопротивление, которое не велико по сравнению с сопротивлением разрушения льда R_p и сопротивления воды R_B . Составляющая сопротивления от разрушения льда [1]:

$$R_p = P_{вп}B(Z_A - Z_B) - B \frac{P_{вп}^2}{2\rho_B g} + f \frac{P_{вп}^2 B}{\rho_B g}, \quad \text{кН} \quad (7)$$

где:

$$(Z_A - Z_B) = \frac{P_{вп}^2}{2\rho_B g} - K_W \sqrt{h}, \quad \text{м}$$

$$K_W = 0,28 \text{ м}^{1/2},$$

f – коэффициент трения материала ГО о лед ($f \approx 0,15$)

Сопротивление воды [1]

$$R_B = 0,40 D g Fr_v^{2,5}, \quad \text{кН} \quad (8)$$

где: Fr_v – число Фруда:

$$Fr_v = \frac{v}{\sqrt{g \sqrt{D/\rho_B}}}$$

v – скорость движения ЛПВП.

При движении ледокола в сплошном льду его сопротивление можно определить так [2]:

$$R = R_p + R_{обл} + R_B \quad (9)$$

где: R_p – сопротивление от разрушения ледяного покрова, кН

$$R_p = C_1 \frac{\sigma_u^2}{Er} B h^2 \quad (10)$$

где: C_1 – эмпирический коэффициент, $C_1 = 6060$;

σ_u – предел прочности льда при изгибе, кПа;

$R_{обл}$ – сопротивление от обломков льда:

$$R_{обл} = \rho_l g B h \left(0,075 \frac{B}{h} + 3,6 Fr_h + 0,84 Fr_h^2 \right) (2 - \bar{S}) \bar{S}^2 \quad (11)$$

где
$$Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

\bar{S} – функция сплоченности льда, в рассматриваемом случае $\bar{S} = 1,0$

R_e – сопротивление воды, определяемое общепринятым способом.

Если ЛПВП движется перед ледоколом или буксиром и разрушает лед, то составляющей R_p у толкающих судов не возникает, лед разрушает ЛПВП. В то же время битый лед, находящийся на дне воздушной впадины, частично раздвигается под кромку толкающим судном, так что можно принять $\bar{S} = 0,7$ [3].

При решении задачи необходимо также учитывать следующие равенства и неравенства:

- $B_{вп} \geq B$

(B – ширина проходящих по каналу судов);

- $1,0 \leq L_{вп}/B_{вп} \leq 1,4$

- Высота ГО

$$h_{го} \geq h$$

- Высота корпуса H принимается исходя из конструктивных соображений, связанных с размещением оборудования.

В качестве примера рассмотрено проектирование ЛПВП для средней Волги с шириной канала $B_k = 18,0$ м, толщиной льда $h = 1,0$ м и длиной ледового канала $l = 300$ м.

Расчет выполнен для ряда площадей ВП от 100 до 700 м². Кривая затрат мощности на разрушение льда приведена на рис. 1

Выбрано два двигателя для вентилятора М633 – мощностью по 630 кВт и частотой вращения 1500 об/мин и площадь ВП 430 м².

В качестве нагнетателя выбраны центробежные вентиляторы ВВН-18 с давлением 10,8 кПа и производительностью $Q_{вп} = 31$ м³/с. Размеры судна в плане 23,9 x 18,0 м. Схема общего расположения ЛПВП приведена на рис. 2.

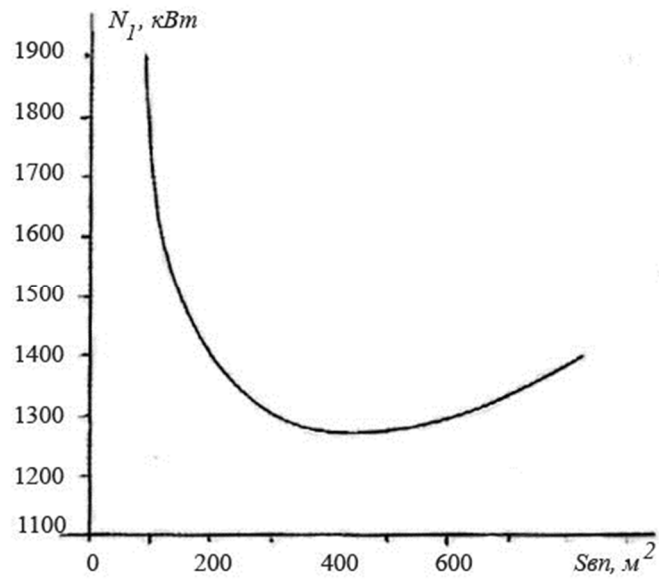


Рис. 1. К выбору оптимальной площади ВП при разрушении льда толщиной 1,0 м

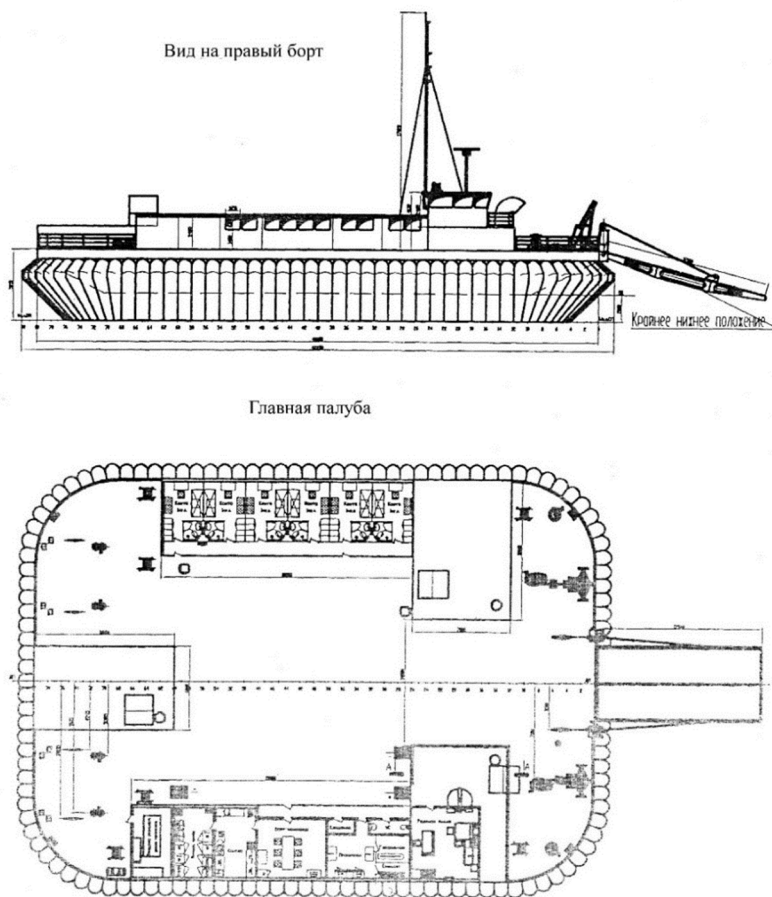


Рис. 2. Схема общего расположения ЛПВП

В дальнейшем для прокладки ледового канала рассматриваются следующие сценарии:

- Движение ледокола пр. 1105;
- Движение ледокола пр. 1105 + ЛПВП;
- Движение буксира пр. 428 + ЛПВП.

Необходимо отметить, что ледокол пр. 1105 может разрушать ледяной покров с малой скоростью до 0,7 м, буксир пр. 428 в сплошном льду работать не может. Некоторые характеристики ледокола и буксира, необходимые для расчета [6]:

ледокол пр. 1105	буксир пр. 428
$B = 16,0$ м	$B = 11,7$ м
$P_e = 410$ кН (тяга на швартовых)	$P_e = 266$ кН
$N = 4650$ кВт	$N = 1470$ кВт

Сопротивление одного ледокола и суммарное сопротивление составов приведены на рис. 3

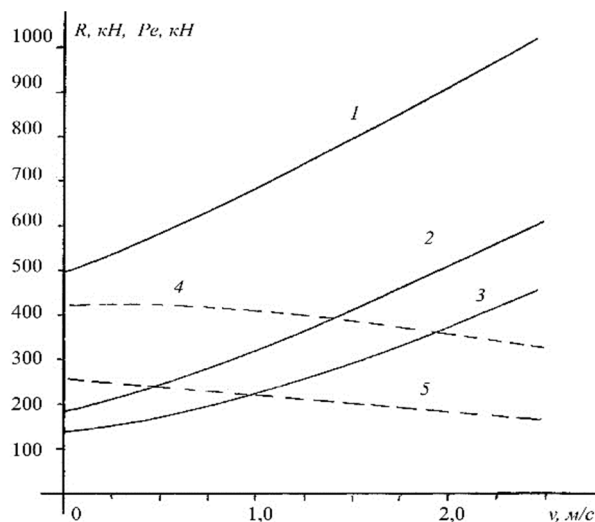


Рисунок 3. Сопротивление в сплошном льду толщиной 1,0 м

1 – ледокол пр. 1105 один; 2 – ледокол пр. 1105 + ЛПВП; 3 – буксир пр. 428 + ЛПВП;
4 – тяговое усилие ледокола пр. 1105; 5 – тяговое усилие буксира пр. 428.

Диаграммы ледопроеходимости представлены на рис. 4

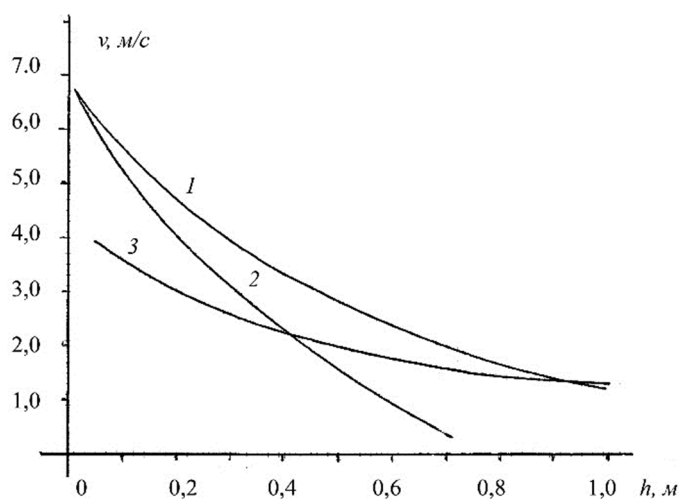


Рисунок 4. Диаграммы ледопроеходимости

1 – ледокол пр. 1105 + ЛПВП; 2 – ледокол пр. 1105 один; 3 – буксир пр. 428 + ЛПВП.

В расчетах принималось $E = 5 \cdot 10^6$ кПа, $\sigma_u = 6 \cdot 10^3$ кПа, $\mu = 0,33$

Расчеты сопротивления и скорости движения показали:

- Буксир пр. 428 преодолевать сплошной лед не может. В счале с ЛПВП (суммарная мощность буксира и ЛПВП: 2730 кВт) состав разрушает сплошной лед толщиной 1,0 м со скоростью 1,8 м/с (6,48 км/ч);
- Линейный ледокол пр. 1105 мощностью 4650 кВт лед толщиной 1,0 м непрерывным ходом разрушить не может. В счале с ЛПВП (суммарная мощность 5910 кВт), состав может двигаться во льду толщиной 1,0 м со скоростью 1,7 м/с (6,1 км/ч).

Количественную оценку технической эффективности в формализованном виде:

$$K = \frac{N_{\Sigma}}{B_{\kappa} h v}, \quad \text{кДж/м}^3 \quad (12)$$

где: N_{Σ} – суммарная мощность состава

По существу, этот коэффициент представляет удельную работу на разрушение единицы объема льда.

Расчет коэффициента K с использованием диаграммы ледопроеходимости приведен на рис. 5.

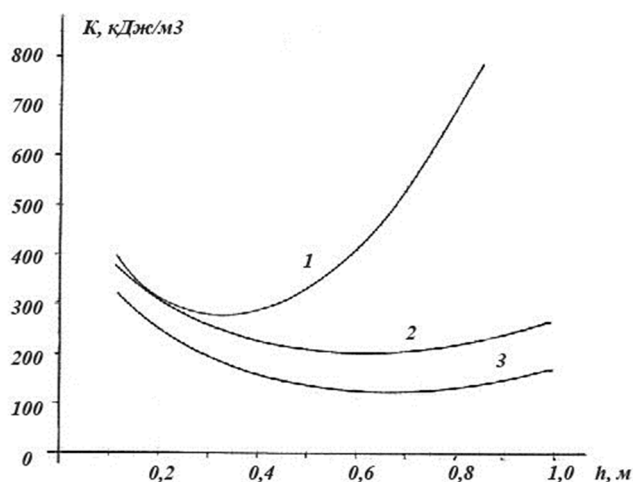


Рисунок 5. Коэффициент технической эффективности

1 – ледокол пр. 1105 один; 2 – ледокол пр. 1105 + ЛПВП; 3 – буксир пр. 428 + ЛПВП.

При расчете экономической эффективности рассмотренных средств разрушения льда для ЛПВП учтена трудоемкость постройки и строительная стоимость, для ледокола и буксира остаточная цена и амортизационные отчисления. Для всех средств определены эксплуатационные расходы [7].

В расчетах эксплуатационных затрат определялись затраты на топливо, зарплату экипажа, амортизационные отчисления.

Экономический показатель эффективности определялся по формуле:

$$\bar{C}_{\text{эф}} = \frac{C_{\text{э}}}{l h v}, \quad \text{руб/м}^3 \quad (13)$$

где: $C_{\text{э}}$ – суммарные экономические затраты.

На рис. 6 приведены удельные экономические показатели для рассмотренных средств.

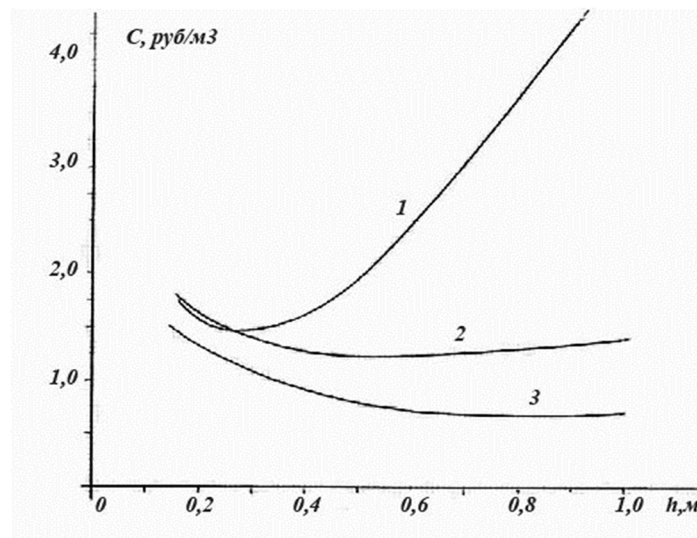


Рис. 6. Показатель эффективности средств прокладки канала.

Обозначения те же, что на рис. 5

Анализ показал, что использование ЛПВП в счале с буксиром или ледоколом при принятых в задаче ограничениях существенно повышает ледопроеходимость, техническую и экономическую эффективность выполнения ледокольной работы.

Список литературы

1. Зуев В.А. Новые технологии разрушения ледяного покрова и продления навигации судами на воздушной подушке /В.А. Зуев//Вопросы морской ледотехники: Тр. ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова.-2007.-Вып.34/318 с.78-9.
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. – СПб.: Судостроение. 2013 – 512 с.
3. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986 г. – 206 с.
4. Демешко Г.Ф. Проектирование судов на воздушной подушке. т. 1, 2. Л.: 1998.
5. Зуев В.А. Оптимизационные задачи проектирования судов. Учебное пособие. Изд-во Нижегородского гос. Технического университета, Н. Новгород, 1991 –74 с.
6. Справочник по серийным транспортным судам. Т.3, М., Транспорт, 1974, 243 с.
7. Экономическое обоснование проектных решений. Пособие для конструктора-судостроителя. Справочник. Л., Судостроение, 1990.

Рецензенты:

Захаров Л.А., д.т.н., профессор кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний

Новгород;

Ваганов А.Б., д.т.н., профессор кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.