

УДК 338.4.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВАРИАНТОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В., Пономарев Р.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** *ЦЕЛЬ:* Оценить экономическую эффективность от организации вариантов тепловой защиты паропроводов. Рассмотрены варианты тепловой защиты из волокнистых изоляционных материалов, а также из материалов на основе кремнеземного аэрогеля. *МЕТОДЫ:* Проведен анализ существующих методик по оценке результирующей экономической эффективности от организации тепловой защиты трубопроводов и выбору наиболее экономичного теплоизоляционного материала. *РЕЗУЛЬТАТЫ:* Приведены результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, для паропроводов различных диаметров при транспортировке теплоносителя с температурой 400 °С. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ:* Показано влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода.

**Ключевые слова:** *тепловая изоляция паропроводов; экономическая эффективность тепловой защиты трубопроводов; инвестиции в мероприятия по энергосбережению; аэрогелевая изоляция; базальтовая тепловая изоляция.*

**Благодарности:** *Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-03-2022-151/1 от 31.01.2022 г.*

**Для цитирования:** Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В., Пономарев Р.А. Экономический эффект вариантов тепловой защиты трубопроводов энергетических комплексов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 103-112.

## ECONOMIC EFFECT OF OPTIONS FOR THERMAL PROTECTION OF PIPELINES OF ENERGY COMPLEXES

Bazukova ER, Vankov YuV, Ponomarev RA.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To evaluate the economic efficiency of the organization of protection of steam pipelines. Variants of thermal protection from fibrous insulating materials, as well as from materials based on silica aerogel, are considered. *METHODS.* An analysis of existing methods for assessing the resulting economic efficiency from the organization of thermal protection of pipelines and the choice of the most economical heat-insulating material has been carried out. *RESULTS.* The results of the calculation of indicators for assessing the economic efficiency of the organization of regulatory thermal protection, made of various heat-insulating materials for steam pipelines of various diameters when transporting a coolant with a temperature of 400 °C are presented. *CONCLUSION.* The influence of the durability of the material on the change of the profitability Index of investment in the normative thermal protection of the steam pipeline is shown.

**Keywords:** *thermal insulation of steam pipelines; economic efficiency of thermal protection of pipelines; investments in energy saving measures; aerogel insulation; basalt thermal insulation.*

**Acknowledgments:** *The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state task No. 075-03-2022-151/1 dated 31.01.2022.*

**For citation:** Bazukova ER, Vankov YuV, Ponomarev RA. *Economic effect of options for*

### **Введение**

На сегодня для изоляции объектов, транспортирующих высокотемпературные тепло и энергоносители, наиболее распространенными остаются волокнистые теплоизоляционные материалы из минеральных волокон (из расплава изверженных горных пород – каменная вата, из расплава доменного шлака – шлаковая вата, из расплава природного песка или стекла – стеклянная вата). Результаты экспериментальной оценки изменения коэффициента теплопроводности тепловой изоляции из базальтового волокна при высоких температурах представлены авторами в работе [1].

Так же следует отметить, относительно новые для Российского рынка – теплоизоляционные материалы из кремнеземного аэрогеля, применяемые в том числе и для изоляции высокотемпературных объектов. Аэрогели относятся к классу мезопористых материалов (размер пор от 5-50 нм). Теплопроводность чистого кремнеземного аэрогеля при нормальных условиях составляет 0,015-0,018 Вт/м·К [2]. Для повышения механической прочности аэрогеля применяют армирование различными волокнами [3-9]. В большинстве случаев добавление волокон для улучшения механических свойств кремнеземистого аэрогеля может отрицательно сказаться на его теплопроводности, так теплопроводность кремнеземного аэрогеля, армированного волокнами арамида, минеральными волокнами, керамическими и стекловолокна, была увеличена до 0,023 Вт/м·К, 0,025 Вт/м·К, 0,041 Вт/м·К, 0,023 Вт/м·К и 0,024 Вт/м·К соответственно [3]. При армировании стекловолокном и углеродным волокном – 0,031 [6]. Также используют различные добавки для уменьшения лучистого теплообмена, например технический углерод или TiO<sub>2</sub>, ZrSiO<sub>4</sub> [10].

Эффект от устройства теплоизоляционной конструкции должен компенсировать затраты, связанные с выполнением и эксплуатацией этих конструкций.

В настоящее время для изоляции высокотемпературных объектов на рынке представлены теплоизоляционные материалы различных производителей, различающиеся ценой, коэффициентом теплопроводности, прочностью, сжимаемостью, предельной температурой применения, долговечностью при эксплуатации в условиях высоких температур.

Экономическая эффективность теплозащиты объекта существенно зависит от выбранного теплоизоляционного материала [11].

При проектировании теплоизоляционных конструкций трубопроводов по нормируемой плотности теплового потока необходимо сравнивать не только коэффициенты теплопроводности материала, т.к. можно подобрать такие толщины материалов, обеспечивающие одинаковый теплозащитный эффект, но также учитывать стоимость погонного метра конструкции, а также долговечность материала в условиях эксплуатации, так как это непосредственно влияет на количество капитальных ремонтов, требующих замены теплоизоляционного материала.

На этапе проектирования теплоизоляционных конструкций для достижения наибольшей экономической эффективности от организованной теплозащиты выбор теплоизоляционного материала необходимо осуществлять с учетом перечисленных выше параметров.

### **Материалы и методы**

В настоящее время существует несколько методик позволяющих оценить результирующую экономическую эффективность от организации теплозащиты объекта, а также провести сравнительную экономическую оценку при выборе теплоизоляционного материала.

При инвестициях в мероприятия по энергосбережению, сравнение различных вариантов инвестиционного проекта рекомендуется<sup>1</sup> производить с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индексы доходности;
- внутренняя норма доходности (ВНД);
- срок окупаемости;

<sup>1</sup> Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов, официальное издание / Утверждено: Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ, Гос. Комитет РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике №ВК 477 от 21.06.1999г., М.: Экономика, 2000 - 414 с.

- другие показатели, отражающие специфику проекта.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) выражает разницу между суммой текущих эффектов за весь расчетный период, приведенной к начальному шагу, и приведенной к тому же моменту времени величиной капитальных вложений (инвестиций).

При разовой (одномоментной) инвестиции ЧДД рассчитывается по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} - K, \quad (1)$$

где  $T$  – горизонт расчета, лет;  $R_t$  – результат от инвестиций в году  $t$ , руб.;  $Z_t$  – текущие затраты в году  $t$  при условии, что в них не входят инвестиции, руб.;  $E$  – норма дисконта;  $K$  – сумма разовых инвестиций, руб;  $R_t - Z_t$  – эффект, достигаемый за год.

Если проект предполагает не разовую инвестицию, а последовательное инвестирование финансовых ресурсов в течение нескольких лет, то ЧДД рассчитывается по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t}, \quad (2)$$

где  $K_t$  – капиталовложения на  $t$ -ом году.

Приведение к базисному моменту времени затрат, результатов и эффектов, имеющих место на  $t$ -ом шаге расчета, производится путем их умножения на коэффициент дисконтирования  $\alpha_t$  определяемый для постоянной нормы дисконта  $E$  как:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (3)$$

Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД) – отношение суммы дисконтированных доходов к абсолютной величине дисконтированной суммы капиталовложений при реализации проекта, рассчитывается по формулам 4-5. Используется для сравнения проектов со схожими показателями ЧДД.

При одномоментных инвестициях:

$$\text{ИДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} / K, \quad (4)$$

если инвестиции осуществляются в течении ряда лет:

$$\text{ИДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} / \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t}, \quad (5)$$

Помимо общепринятых показателей для финансово-экономической оценки эффективности инвестиционных проектов, сравнение различных изоляционных материалов можно осуществлять, используя критерии экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов, описанные в работах [11, 12].

В работах [11,12] отмечается наиболее простой способ сравнительной оценки различных теплоизоляционных материалов – сопоставление произведений  $S_m \lambda_m$  (цены кубического метра изоляционного материала и его коэффициента теплопроводности), либо сопоставление произведений стоимости одного погонного метра изоляционной конструкции на коэффициент теплопроводности материала (в этом случае учитываются толщины изоляционного слоя). В работе [11] данный критерий  $S_m \lambda_m$  рассматривается как комплексный показатель эффективности теплоизоляционных материалов первого рода. Данный критерий может использоваться для сопоставления различных теплоизоляционных материалов, имеющих одинаковый нормативный срок службы. Изоляционная конструкция, у которой это произведение будет наименьшим, принимается как наиболее экономичная.

В работе [11] был предложен дифференциальный критерий потребительской

эффективности теплоизоляционных материалов  $\sigma_T$ :

$$\sigma_T = \frac{c_3}{c_T \cdot \lambda_T} \cdot 10^6, \quad (6)$$

где  $c_T$  – стоимость теплоизоляционного материала, руб/м<sup>3</sup>;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м<sup>0</sup>С;  $c_3$  – стоимость тепловой энергии, руб/Вт·ч;  $\sigma_0$  – постоянный множитель, равный  $10^6$ , Вт<sup>2</sup>·ч/м<sup>4</sup>·<sup>0</sup>С.

Безразмерный параметр, численно равный отношению элементарного теплозащитного эффекта (сокращение стоимости потерянной теплоты) при некоторых выбранных стандартных условиях к элементарным капитальным вложениям в этот слой [11]. Данный критерий рассматривается, как комплексный критерий эффективности теплоизоляционных материалов второго рода.

Существенным недостатком вышеупомянутых комплексных критериев, как указано в работе [11], является то, что ни один из них не учитывает долговечности материала.

Для учета долговечности предлагается [11] комплексный критерий третьего рода –  $p_T$  (полный потребительский потенциал теплоизоляционного материала), представляющий собой отношение дисконтированной в течение всего срока службы материала прибыли от устройства элементарного теплозащитного слоя к капитальным вложениям в этот слой при стандартных условиях сопоставления.

Преобразовав выражение для определения индекса доходности инвестиций (4) под условия организации теплозащиты объекта, с расчётом коэффициента дисконтирования прибыли за срок службы теплоизоляционного материала, автор [11] получил следующее выражение:

$$p_T = 0,125 \cdot \alpha \cdot \frac{c_3}{c_T \cdot \lambda_T} = 0,125 \cdot \alpha \cdot \sigma_T \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент дисконтирования прибыли, лет, равный сумме дисконтирующих множителей за весь срок службы материала.

В случае если срок службы материала меньше срока службы объекта учитывается дисконтирование капложений, связанных с заменой теплоизоляционного материала, а эффект от теплозащиты рассчитывается на весь срок службы изолируемого объекта. В данном случае вводится понятие «частный потребительский потенциал теплоизоляционного материала», определяемый по следующему выражению:

$$p_T^* = p_T \frac{\alpha^*}{\alpha \cdot \beta} \quad (8)$$

где  $\alpha^*$  – коэффициент дисконтирования эффекта от теплозащиты, лет, рассчитанный на срок службы изолируемого объекта;  $\beta$  – коэффициент дисконтирования дополнительных капитальных вложений, при замене изоляции.

Так как частный потребительский потенциал связан с индексом доходности инвестиций, то соответственно наибольшие значения  $p_T^*$  способны обеспечивать наибольшие индексы доходности и при нормативной и при оптимальной теплозащите плоских поверхностей [12].

Сравнение частных потребительских потенциалов лежит в основе методики сопоставления и выбора теплоизоляционных материалов, предложенной автором [12].

Но при организации тепловой защиты трубопроводов, значительное влияние оказывает кривизна изолируемых поверхностей, поэтому автор [12] адаптирует выражение (8) к условиям теплозащиты трубопроводов введением поправочного коэффициента на цилиндрическую форму:

$$m_{\text{тр}} = (\alpha_n \cdot R_{0,\text{ст}})^2 \cdot \frac{1}{Bi} \cdot (Bi - 1) \quad (9)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплоизоляционного слоя, Вт/м<sup>2</sup>·<sup>0</sup>С, расчетное значение определяемое для каждого конкретного случая;  $R_{0,\text{ст}}$  – термическое сопротивление стандартной плоской стенки равное 1,0 м<sup>2</sup>·<sup>0</sup>С/Вт;  $Bi$  – модифицированный критерий Био, зависящий от диаметра трубопровода, коэффициента теплоотдачи с поверхности трубопровода и от коэффициента теплопроводности

материала.

Использование предложенных [11] комплексных критериев первого второго и третьего рода в случае выбора теплоизоляционного материала для плоской поверхности упрощает оценку потенциального экономического эффекта при использовании выбираемых материалов.

Однако при организации тепловой защиты трубопроводов, методика, предложенная автором [12] значительно усложняется в расчетах из-за необходимости учета влияния диаметра трубопроводов на снижение доходности инвестиций.

### Результаты

Влияние теплопроводности, долговечности и стоимости материала на экономическую эффективность организованной теплозащиты рассмотрим на примере паропровода надземной прокладки, транспортирующего пар с температурой 400 °С. Продолжительность эксплуатации паропровода, принималась круглогодичной. Среднегодовая температура наружного воздуха для города Нижнекамск – 4 °С. Срок службы паропровода принимался 20 лет. Толщина теплоизоляционного слоя  $\delta$ , м, определялась по нормируемой плотности теплового потока в соответствии с методикой СНИП-41-03-2003 (результаты в таблице 1). Для уплотняемых материалов (БСТВ-30, БСТВ-60) расход теплоизоляционного материала на 1 п.м трубопровода рассчитывался с учетом коэффициента уплотнения  $K_c$ , определяемого по рекомендациям СНИП-41-03-2003.

Нормируемая удельная линейная плотность теплового потока,  $q_l^H$ , Вт/м, в зависимости от диаметра паропровода и температуры пара определялась по методическим указаниям министерства энергетики<sup>2</sup>. Стоимость теплоизоляционной конструкции,  $S_0$ , руб/п.м., рассчитывалась на 1 п.м паропровода исходя из необходимой толщины материала, стоимости теплоизоляционного материала и стоимости покрывного материала. В качестве покрывного материала для всех вариантов были приняты оболочки из нержавеющей стали толщиной 0,80 мм.

Цены на теплоизоляционные и покрывной материалы определялась из источников в сети Интернет [13-15]. Ожидаемая ежегодная экономия (эффект) от организации нормативной тепловой защиты паропровода определялась в сравнении с неизолированным паропроводом. Норма дисконта принималась 15%. Амортизация – 5% годовых от капитальных затрат. Годовые отчисления на ремонт и обслуживание изоляции - 6% от капитальных затрат. Налог на прибыль – 20%. Тарифная стоимость тепловой энергии, отпускаемой в виде пара 1070 руб/Гкал.

Реальный срок службы волокнистых теплоизоляционных материалов, в которых для скрепления волокон используется полимерное связующее, при эксплуатации в условиях высоких температур не будет соответствовать нормативному сроку службы паропровода, что потребует дополнительных капитальных вложений при замене тепловой изоляции.

Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты паропровода, выполненной из различных теплоизоляционных материалов представлены в таблице 1.

Рассматриваемые теплоизоляционные материалы: 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 120; 3 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel; 4 – аэрогелевое полотно на основе стеклохолста Pyshield Pro; 5 – базальтовое супертонкое волокно БСТВ 30.

При расчете показателей для финансово-экономической оценки эффективности организованной теплозащиты, длина рассматриваемого периода принималась равной нормативному сроку службы эксплуатируемого трубопровода.

Таблица 1

Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты паропровода

Параметры	Материалы				
	BOS 100	BOS 120	Evergel	Pyshield Pro	БСТВ 30
$\lambda$ , Вт/м·°С	0,0697	0,0637	0,0268	0,029	0,0935
Срок службы материала, лет	10	10	>20	>20	>20

<sup>2</sup> Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 325 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902148459>.

Цена материала руб/м <sup>2</sup>	*	*	3529**	3562***	-
Цена материала руб/м <sup>3</sup>			-	-	5700

Продолжение таблицы 1

Диаметр 159 мм					
Эффект, руб/м год	78304				
$q_l^H$ , Вт/м	182				
$\delta$ , м	0,123	0,108	0,034	0,038	0,200
$S_0$ , руб/п.м.	7929	8676	7676	9932	8862
ЧДД, руб/м	438569	437405	441145	438272	439635
ИДД	43	39	57	44	50
Диаметр 273 мм					
Эффект, руб/м год	124863				
$q_l^H$ , Вт/м	236				
$\delta$ , м	0,145	0,128	0,044	0,048	0,224
$S_0$ , руб/п.м.	14501	16282	15355	19789	12641
ЧДД, руб/м	695936	693668	699477	693830	702933
ИДД	37	33	46	35	56
Диаметр 325 мм					
Эффект, руб/м год	145308				
$q_l^H$ , Вт/м	259				
$\delta$ , м	0,152	0,135	0,047	0,051	0,232
$S_0$ , руб/п.м.	15222	15984	18518	23146	14337
ЧДД, руб/м	813055	811868	813184	807291	818509
ИДД	42	40	44	35	57
Диаметр 426 мм					
Эффект, руб/м год	184085				
$q_l^H$ , Вт/м	301				
$\delta$ , м	0,163	0,145	0,052	0,057	0,243
$S_0$ , руб/п.м.	19071	23427	24675	35195	17436
ЧДД, руб/м	1030360	1023574	1028644	1015247	1037864
ИДД	42	34	42	29	60

Примечание: \* – цена за теплоизоляционные цилиндры представляется производителем за 1 погонный метр в зависимости от внутреннего диаметра цилиндра и толщины слоя, для материала BOS100 для изолируемого трубопровода диаметром 159 мм – 4256 руб/пм, 273 мм – 9392 руб/пм, 325 мм – 9575 руб/пм, 426 мм – 12347 руб/пм, для материала BOS120 для изолируемого трубопровода диаметром 159 мм – 5183 руб/пм, 273 мм – 11443 руб/пм, 325 мм – 10516 руб/пм, 426 – 16882 руб/пм; \*\* – цена материала Evergel за квадратный метр толщиной 13 мм; \*\*\* – цена материала Pyshield Pro за квадратный метр толщиной 10 мм.

В работе [12] показано, что главным критерием выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала при устройстве нормативной теплозащиты трубопроводов должен быть индекс доходности инвестиций.

Увеличение диаметра трубопровода оказывает влияние на изменение индекса доходности организованной теплозащиты.

Изменение индекса доходности инвестиций при организации нормативной теплозащиты, рассмотренного паропровода, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, в зависимости от увеличения диаметра отображено на рис. 1.

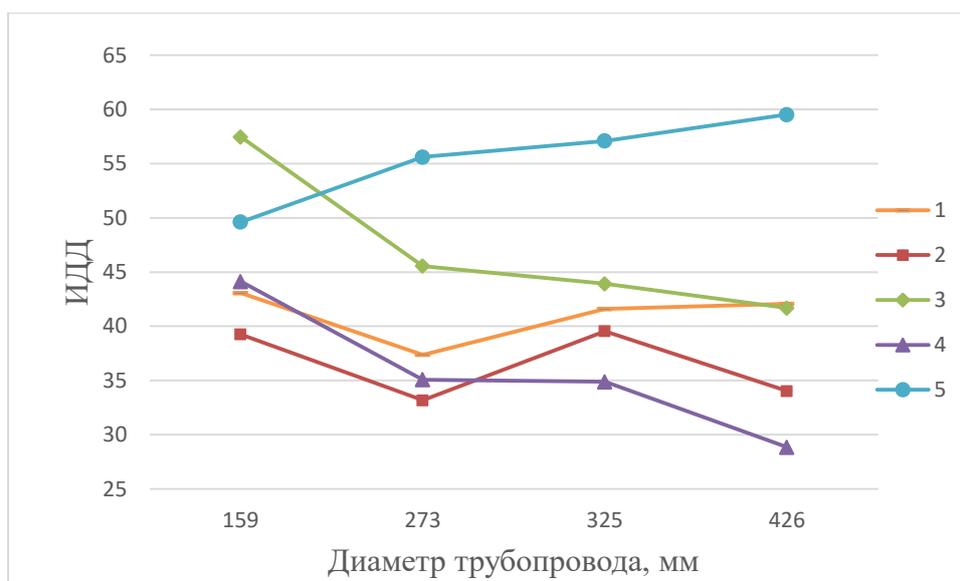


Рис. 1. Изменение индекса доходности инвестиций при организации нормативной теплозащиты паропровода в зависимости от увеличения диаметра, 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 120; 3 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel; 4 – аэрогелевое полотно на основе стеклохолста Pyshield Pro; 5 – базальтовое супертонкое волокно БСТВ 30

Fig. 1. Changes in the investment profitability index in the organization of standard thermal protection of the steam pipeline depending on the increase in diameter, 1 - basalt thermal insulation cylinders BOS 100; 2 - basalt thermal insulation cylinders BOS 120; 3 - aerogel mat based on Evergel glass canvas; 4 - aerogel canvas based on Pyshield Pro glass canvas; 5 - basalt super-thin fiber BST 30

Влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода рассмотрим (рис. 2) на примере двух изоляционных материалов: 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

#### Обсуждение

Анализируя графики на рис. 1. и результаты, представленные в таблице 1 видно, что в данном случае для паропровода диаметром 159 мм экономически целесообразным является выбор материала №3 (Evergel) несмотря на то, что данный материал в сравнении цен за один кубический метр является самым дорогим (271461 руб/м<sup>3</sup>). Высокая стоимость кубического метра данного материала во многом обусловлена отсутствием производства материала в Российской Федерации. Выбор материала №3 для данного паропровода способен обеспечить наибольший индекс доходности инвестиций 57 по сравнению с другими рассматриваемыми материалами (в 1,5 раз выше, чем при выборе материала №2). Разница между чистым дисконтированным доходом при использовании материала №3 по сравнению с материалом №2 составляет 3740 руб/м. В случае использования для трубопровода диаметром 273 мм близких по стоимости за погонный метр теплоизоляционной конструкции материалов №2 и №3 разница между чистым дисконтированным доходом составит 5809 руб/м. Для диаметров от 273 мм в рассмотренном случае сравнительная экономическая оценка показывает преимущества материала №5 (БСТВ 30). Однако следует учитывать, что при использовании данного материала толщина теплоизоляционного слоя получается наибольшей. Кроме того, необходимо также учитывать высокий коэффициент уплотнения материала. В тех случаях, когда получаемая толщина теплоизоляционного слоя удовлетворяет техническим требованиям заказчика, выбор данного материала является оптимальным.

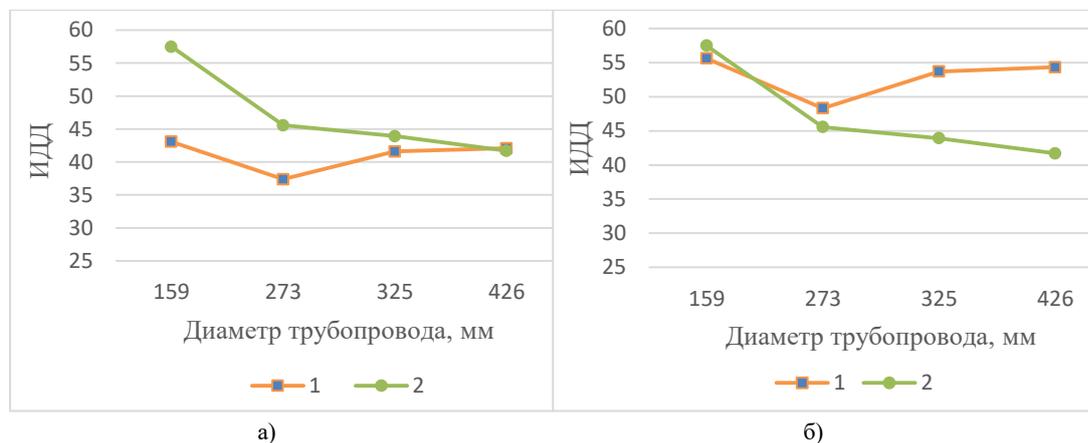


Рис. 2. Изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту: а) с учётом необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее; б) без учёта необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее. 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

Fig. 2. Change in the performance index for investment in thermal protection: a) taking into account the need to replace the material containing the polymer binder; b) without taking into account the need to replace the material containing the polymer binder. 1 - BOS 100 basalt thermal insulation cylinders; 2 - Evergel glass canvas based aerogel mat.

Как видно из графиков на рис.2, долговечность теплоизоляционного материала оказывает непосредственное влияние на результаты финансово-экономической оценки эффективности инвестиций в организацию теплозащиты трубопроводов при транспортировке теплоносителей.

#### Заключение

Для достижения наибольшей экономической эффективности при организации нормативной тепловой защиты трубопроводов необходимо на этапе проектирования теплоизоляционных конструкций сравнивать не только коэффициенты теплопроводности выбираемых материалов, но также учитывать стоимость погонного метра конструкции, а также реальную долговечность материала в условиях эксплуатации.

Показано, что для трубопроводов с малым диаметром при организации нормативной тепловой защиты наибольшая экономическая эффективность может достигаться при использовании материалов с минимальной теплопроводностью, несмотря на высокую стоимость таких материалов.

На примере транспортировки теплоносителя с температурой 400 °С показано, что в зависимости от совокупности физических, стоимостных и эксплуатационных свойств выбираемого материала можно добиться увеличения индекса доходности инвестиций от организации нормативной теплозащиты в 1,5-2 раза.

Показано влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода.

#### Литература

1. Vankov Y., Bazukova E., Emelyanov D., Fedyukhin A., Afanaseva O., Akhmetova I., Berardi U. Experimental Assessment of the Thermal Conductivity of Basalt Fibres at High Temperatures. *Energies*. 2022; 15(8):2784. <https://doi.org/10.3390/en15082784>
2. Garay Martinez, R., Goiti, E., Reichenauer, G., Zhao, S., Koebel, M., Barrio, A. Thermal assessment of ambient pressure dried silica aerogel composite boards at laboratory and field scale (2016) *Energy and Buildings*, 128, pp. 111-118, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.071
3. Shafi, S., Tian, J., Navik, R., Gai, Y., Ding, X., Zhao, Y. Fume silica improves the insulating and mechanical performance of silica aerogel/glass fiber composite (2019) *Journal of Supercritical Fluids*, 148, pp. 9-15, doi: 10.1016/j.supflu.2019.02.027
4. Berardi, U., (Mark) Zaidi, S. Characterization of commercial aerogel-enhanced blankets obtained with supercritical drying and of a new ambient pressure drying blanket (2019) *Energy and Buildings*, 198, pp. 542-552. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.027
5. Agnieszka Ślosarczyk, Strauchmann Wojciech, Ziółkowski Piotr, Jakubowska Paulina,

Synthesis and characterization of carbon fiber/silica aerogel nanocomposites (2015) *Journal of Non-Crystalline Solids*, 416, pp. 1-3. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.02.013

6. Hung, W.-C., Horng, R.S., Shia, R.-E. Investigation of thermal insulation performance of glass/carbon fiber-reinforced silica aerogel composites (2021) *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 97 (2), pp. 414-421, doi: 10.1007/s10971-020-05444-3

7. Luo, Y., Jiang, Y., Feng, J., Guan, Y., Feng, J. Progress on the Preparation of SiO<sub>2</sub> Aerogel Composites by Ambient Pressure Drying Technique (2018) *Cailiao Daobao/Materials Review*, 32 (3), pp. 780-787. doi: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.05.014

8. Berardi, U. Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study (2018) *Energy and Buildings*, 159, pp. 370-381. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.092

9. Lee, K.-Y., Mahadik, D.B., Parale, V.G., Park, H.-H., Composites of silica aerogels with organics: a review of synthesis and mechanical properties (2020) *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (1), doi: 10.1007/s43207-019-00002-2

10. Fomitchev, D.V., Trifu, R., Gould, G. Fiber Reinforced Silica Aerogel Composites: Thermal Insulation for High-Temperature Applications (2004) *Engineering Construction and Operations in Challenging Environments Earth and Space*, doi: 10.1061/40722(153)132

11. Ю.Г. Иващенко, Б.А. Семенов, Г.Г. Старостин, А.Ю. Букарева, О.П. Критерии технико-экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов с учетом их долговечности // *Известия высших учебных заведений. строительство*. 2004. №2. С. 32-38.

12. Хомякова О.П. Оптимизация теплозащиты трубопроводов и оборудования тепловых сетей: Дис. канд. тех. наук 05.14.04, 2007, Саратов, 206 с.

13. <https://reterma.ru/product/mpb-30-0-2000-1000-80/>

14. [https://xn-b1agyekgek.xn-p1ai/catalog/aerogel\\_evergel/](https://xn-b1agyekgek.xn-p1ai/catalog/aerogel_evergel/)

15. [https://xn-b1agyekgek.xn-p1ai/catalog/isomag\\_obolochki/](https://xn-b1agyekgek.xn-p1ai/catalog/isomag_obolochki/)

#### Авторы публикации

**Базукова Эльвира Раисовна** – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

**Пonomarev Роман Андреевич** – аспирант 1-го года обучения, Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Vankov Y., Bazukova Y., Emelyanov D., et al. Experimental evaluation of heat conductivity of basalt fibers at high temperatures. *Energies*. 2022; 15(8):2784. <https://doi.org/10.3390/en15082784>

2. Garay Martinez, R., Goity, E., Reichenauer, G., Zhao, S., Kobel, M., Barrio, A. Thermal evaluation of pressurized aerogel plates in the laboratory and field scale (2016) *Energy and Buildings*, 128, pp. 118-121, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.062

3. Shafi, S., Tian, J., Navik, R., et al. Fume silica improves the insulation and mechanical characteristics of silica/fiberglass composite (2019) *Journal Supercritical Fluids*, 148, p. 9-15, doi: 10.1016/j.supflu.2019.06.001

4. Berardi, U., (Mark) Zaidi, S. Characteristics of commercial aerogel blankets obtained by supercritical drying, and new blanket for pressure drying (2019) *Energy and Buildings*, 198, pp. 542-552. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.06.027

5. Agnieszka Shlosarchik, Straruchman Wojciech, Ziolkovski Peter, Jakubovskaya Paulina, Synthesis and Characteristic of Carbon Fiber/Silica Aerogel Nanocomposites (2015) *Journal of Non-crystalline Solids*, 416, pp. 1-3. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.02.013

6. Hung, W.-C., Horng, R.S., Shia, R.-E. Study of thermal insulation efficiency of glass/carbon fibre aerogel composites (2021) *Journal Sol-Gel Science and Technology*, 97 (2),

pp. 414-421, doi: 10-020-10020.

7. Luo, Y., Jiang, Y., Feng, J. *Progress in the preparation of SiO<sub>2</sub> aerogel composites by pressure drying* (2018) *Cailiao Daobao/Materials Review*, 32 (3), p. 780-780. MY: 10.11896/j.issn.. 1005-023x.2018.05.014

8. Berardi, U. Aerogel. *Advanced Building Reconstruction Systems: Case Study Results* (2018) *Energy and Buildings*, 159, pp. 370-381. MY: 10.1016/j.enbuild.2017.10.

9. Lee, K.-Y., Mahadik, D.B., Parale, V.G., Park, H.-H., *Composites of silica aerogels with: a review of synthesis and mechanical properties* (2020) *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (1), doi: 10010.007/43007-202

10. Fomitchev, D.V., Trifu, R., Gould, G. *Fiber Reinforced Silica Aerogel Composites: Thermal Insulation for High-Temperature Applications* (2004) *Engineering Construction and Challenging in Environments Earth and Space*, doi: 10.1061/40722(132)

11. Y.G. Ivaschenko, B.A. Semyonov, G.G. Starostin, A.Y. Bukareva, O.P. *Criteria of technical and economic evaluation of potential efficiency of insulation materials taking into account their durability. Izvestia of higher education institutions. construction.* 2004;2:32-38.

12. Khomyakov O.P. *Optimization of heat protection of pipelines and equipment of heat networks*: Dis. Kand. of science 05.14.04, 2007, Saratov, 206 p.

13. <https://reterma.ru/product/mpb-30-0-2000-1000-80/>

14. [https://xn-b1agyegek.xn-p1ai/catalog/aerogel\\_evergel/](https://xn-b1agyegek.xn-p1ai/catalog/aerogel_evergel/)

15. [https://xn-b1agyegek.xn-p1ai/catalog/isomag\\_obolochki/](https://xn-b1agyegek.xn-p1ai/catalog/isomag_obolochki/)

#### **Authors of the publication**

**Elvira R. Bazukova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Yuri V. Vankov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Roman A. Ponomarev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено** 30.11.2022г

**Отредактировано** 05.12.2022г.

**Принято** 12.12.2022г.