

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ КРУПНОГО ХИМИЧЕСКОГО И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА. ЧАСТЬ 1

В. Л. Юша¹, М. А. Сутягинский², Ю. А. Потапов²

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²АО «Группа компаний «Титан»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 22

Рассмотрен вопрос целесообразности повышения энергоэффективности крупного химического и нефтеперерабатывающего производства путем замены печных нагревателей технологических теплоносителей и сырья на парокомпрессионные тепловые насосы. Выполнен анализ взаимосвязи технической конфигурации парокомпрессионных тепловых насосов, режимных параметров их эксплуатации (определяющих величину коэффициента преобразования энергии) и соотношения стоимости различных энергоносителей. Представленные результаты сравнительного анализа энергоэффективности различных вариантов замены печь–парокомпрессионный тепловой насос отражают определяющее влияние технического уровня и конструктивной конфигурации парокомпрессионного теплового насоса на выбор предпочтительного варианта модернизации. Однако существенное различие в коммерческих ценах на энергоносители значительно изменяет предпочтительное ранжирование этих вариантов.

Ключевые слова: преобразователь энергии, парокомпрессионный тепловой насос, печь, коэффициент преобразования энергии, КПД, газовое топливо, пар, электроэнергия, удельная себестоимость тепловой энергии.

Введение

Инженерная и научно-техническая составляющие крупного химического и нефтеперерабатывающего производства становятся всё более значимым фактором, обеспечивающим его безопасность, устойчивость и развитие. В настоящее время они приобретают государственное значение как необходимое условие обеспечения технологической безопасности. На заседании по стратегическому развитию и нацпроектам (декабрь 2022 года) Президент РФ выделил шесть ключевых задач для экономики страны на 2023 год, среди которых — укрепление технологического суверенитета и движение к лидерству по основным направлениям в этой сфере; опережающий рост обрабатывающей промышленности [1].

Одним из наиболее актуальных направлений повышения технико-экономического уровня крупных нефтеперерабатывающих и химических предприятий всегда было и на сегодняшний день остаётся обеспечение высокого уровня энергосбережения. При наличии развитых потоков технологических и энергетических теплоносителей не всегда удаётся полностью избежать потерь низкопотенциальной тепловой энергии. В этой связи в мировой практике всё большее распространение получают тепловые насосы (далее — ТН), позволяющие реализовать одну из наиболее эффективных энергосберегающих технологий (далее — ТН-технология) [2–8]. Актуальность ТН-технологии отражена в международных и государственных программах по разви-

тию и внедрению энергосберегающих технологий трансформации тепловой энергии на базе ТН [5, 9, 10]. Анализ публикаций, посвящённых исследованию термодинамической эффективности ТН показывает, что величину коэффициента преобразования k_T определяют как правило величиной произведённого тепла на единицу затраченной работы или отношением суммарной тепловой мощности (теплопроизводительности) ТН к затраченной на привод компрессора электрической мощности [2, 4–6, 9–11]. Применительно к крупному энергоёмкому производству привод компрессора может осуществляться и от других источников энергии, а при реализации цикла ТН помимо энергии, преобразованной в компрессоре, к его рабочему телу также может подводиться (или отводиться) тепловая энергия от дополнительных источников [12, 13]; с учётом этого величину k_T в нашем случае более корректно определять как отношение полученного энергетического эффекта к затраченной в цикле механической работы или другой эквивалентной энергии [14].

Очевидно, что при решении задач по модернизации или реконструкции производственных объектов ключевую роль будет играть и экономический фактор. При этом стоимость различных видов энергии может стать определяющей на ранней стадии проектирования при выполнении сравнительной оценки применимости одного из возможных технологических вариантов преобразования тепловой энергии и повышения её температурного уровня. В совокупности с данными по термодинамиче-

Таблица 1. Классификация преобразователей тепловой энергии
Table 1. Classification of thermal converters

№ п/п	Наименование преобразователя	Основные функциональные компоненты преобразователя	Источник энергии, потребляемой преобразователем
1	Печь	Печь	Печное топливо
2	ТН с электроприводом (ТН2)	Компрессор, электродвигатель, теплообменное оборудование	Коммерческая электроэнергия
3	ТН с электроприводом и электрогенератором (ТН3)	Компрессор, электродвигатель, теплообменное оборудование, электрогенератор (на базе ГПУ или ГТУ)	Печное (или какое-либо другое) топливо
4	ТН на базе цикла Ренкина — А (ТН4)	Компрессор, силовой агрегат на базе цикла Ренкина, теплообменное оборудование, теплогенератор (печь)	Печное (или какое-либо другое) топливо
5	ТН на базе цикла Ренкина — В (ТН5)	Компрессор, силовой агрегат на базе цикла Ренкина, теплообменное оборудование (в том числе подачи тепловой энергии от паровой сети в контур цикла Ренкина)	Коммерческий пар
6	ТН на базе ГПУ или ГТУ (ТН6)	Компрессор, силовой агрегат на базе ГПУ или ГТУ, теплообменное оборудование	Печное (или какое-либо другое) топливо

ской эффективности теплотехнических процессов и по техническому уровню оборудования дополнительный стоимостный фактор позволяет выполнить сравнительную оценку снижения затрат за счёт энергосбережения. В случае принятия решения по внедрению энергосберегающих технологий в реальное производство неизбежно встанет вопрос о выборе соответствующей технологии и оборудования для её реализации.

Наряду с печными технологиями, работающими на органическом топливе, в настоящее время известны и другие способы повышения температурного уровня теплоносителей, например, пароконпресссионные и абсорбционные (АБТН) тепловые насосы, электрические печи и нагреватели. В большинстве случаев электрическая энергия существенно дороже других источников энергии, вследствие чего преобразователи типа «электричество — тепло» заведомо неэффективны. Преобразователи типа АБТН широко применяются в промышленных теплоэнергетических системах, взаимосвязь их характеристик с технологическими температурными режимами подробно исследована. Однако, в силу ряда недостатков (невысокая энергоэффективность; громоздкость и сложность конструкции; трудоёмкая технология регулирования и запуска установки; повышенные антикоррозионные требования к конструкционным материалам [2, 12, 15–17]), АБТН существенно уступают преобразователям пароконпресссионного типа на рынке ТН. Вследствие этого и с учётом многообразия вариантов реализации (некоторые из возможных вариантов представлены в табл. 1) в рамках данной статьи представляется целесообразным ограничиться сравнительным анализом эффективности пароконпресссионных ТН и преобразователей печного типа. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики сравнительной прогнозной оценки целесообразности применения отдельных видов ТН-технологий и исследование взаимосвязи их термодинамических, технических и стоимостных факторов.

Методика расчёта

В рассматриваемом случае объектом исследования являются пароконпресссионные ТН различных конструктивных конфигураций, выполняющие

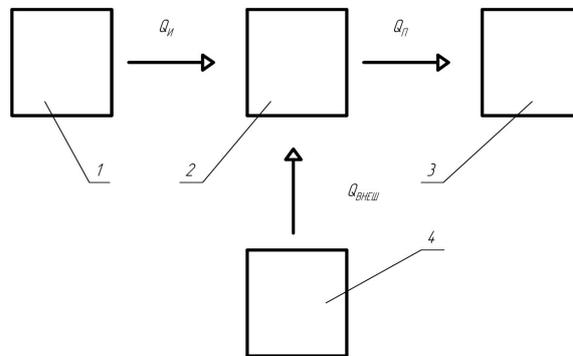


Рис. 1. Принципиальная схема повышения температурного уровня технологического теплоносителя:

1 — низкопотенциальный (низкотемпературный) источник тепловой энергии; 2 — преобразователь (трансформатор) энергии; 3 — высокопотенциальный (высокотемпературный) потребитель тепловой энергии; 4 — дополнительный источник энергии

Fig. 1. Schematic diagram of increasing the temperature level of the process heat carrier:

1 — Low-potential (low-temperature) source of thermal energy; 2 — Converter (transformer) of energy; 3 — High-potential (high-temperature) consumer of thermal energy; 4 — Additional energy source

функцию преобразователя энергии в составе энергетической системы, обеспечивающей передачу тепловой энергии от источника к потребителю (рис. 1). Базовым вариантом преобразователя для сравнения являются печи (табл. 1). При этом к преобразователю подводится дополнительная внешняя энергия $Q_{внеш}$, что позволяет увеличить тепловую энергию $Q_{н'}$ получаемую от источника, до величины $Q_{н'}$ передаваемой потребителю (рис. 1). Предметом исследования является взаимосвязь технико-экономических характеристик преобразователя с его конструктивными и режимными параметрами и определение условий целесообразности замены преобразователей печного типа на пароконпресссионные ТН.

Предположим, что, в соответствии с технологической схемой (рис. 1), необходимо, чтобы преобразователь при передаче тепловой энергии от источника к потребителю обеспечил её увеличение

Таблица 2. Методика расчёта удельной стоимости тепловой энергии
Table 2. Methodology for calculating the unit cost of thermal energy

№ п/п	Преобразователь	Расчётная формула удельной стоимости	Примечание
1	Печь	$C_{\text{YA1}} = \Pi_{\text{т1}} / (\eta_{\text{п}} \cdot k_{\text{т1}})$	$k_{\text{т1}} = 1$
2	ТН2	$C_{\text{YA2}} = \Pi_{\text{з}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭА}} \cdot k_{\text{т2}})$	$k_{\text{т2}} = k_{\text{тi}} = k_{\text{т}}^*$ при $i = 2 \dots 6$
3	ТН3	$C_{\text{YA3}} = \Pi_{\text{т3}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{Од}} \cdot \eta_{\text{тГ}} \cdot k_{\text{т3}})$	$k_{\text{т3}} = k_{\text{тi}} = k_{\text{т}}^*$ при $i = 2 \dots 6$
4	ТН4	$C_{\text{YA4}} = \Pi_{\text{т4}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot k_{\text{т4}})$	$k_{\text{т4}} = k_{\text{тi}} = k_{\text{т}}^*$ при $i = 2 \dots 6$
5	ТН5	$C_{\text{YA5}} = \Pi_{\text{пар}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}} \cdot \eta_{\text{тпар}} \cdot k_{\text{т5}})$	$k_{\text{т5}} = k_{\text{тi}} = k_{\text{т}}^*$ при $i = 2 \dots 6$
6	ТН6	$C_{\text{YA6}} = \Pi_{\text{т6}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ГДВ}} \cdot k_{\text{т6}})$	$k_{\text{т6}} = k_{\text{тi}} = k_{\text{т}}^*$ при $i = 2 \dots 6$

Таблица 3. Методика сравнительной оценки технического уровня преобразователей
Table 3. Methodology for comparative assessment of the technical level of Converters

№ п/п	Преобразователь	КПД преобразователя	Условие целесообразности замены печи на ТН
1	Печь	$\eta_{\text{пр1}} = \eta_{\text{п}}$	
2	ТН2	$\eta_{\text{пр2}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭА}}$	$k_{\text{т2}} > \eta_{\text{п}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭА}})$
3	ТН3	$\eta_{\text{пр3}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭА}} \cdot \eta_{\text{тГ}}$	$k_{\text{т3}} > \eta_{\text{п}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭА}} \cdot \eta_{\text{тГ}})$
4	ТН4	$\eta_{\text{пр4}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}} \cdot \eta_{\text{п}}$	$k_{\text{т4}} > 1 / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}})$
5	ТН5	$\eta_{\text{пр5}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}} \cdot \eta_{\text{тпар}}$	$k_{\text{т5}} > \eta_{\text{п}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АП}} \cdot \eta_{\text{тпар}})$
6	ТН6	$\eta_{\text{пр6}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ГДВ}}$	$k_{\text{т6}} > \eta_{\text{п}} / (\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ГДВ}})$

на величину теплопроизводительности преобразователя $Q = Q_{\text{п}} - Q_{\text{и}}$. Очевидно, что для производства этого количества тепловой энергии к преобразователю должна быть подведена некоторая дополнительная внешняя энергия $Q_{\text{внеш}}$, величина которой определяется характеристиками преобразователя [11–15]:

$$Q_{\text{внеш}} = Q / (\eta_{\text{пр}} \cdot k_{\text{т}}), \quad (1)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ — КПД преобразователя, $k_{\text{т}}$ — коэффициент преобразования (трансформации).

Соответственно, стоимость выработанной преобразователем тепловой энергии определяется как

$$C = Q \cdot \Pi / (\eta_{\text{пр}} \cdot k_{\text{т}}), \quad (2)$$

где Π — стоимость единицы дополнительной внешней энергии (в нашем случае удобнее рассматривать в качестве её единицы измерения руб/кВт, так как в качестве альтернативных рассматриваются различные виды энергии (табл. 1).

Тогда в общем случае выражение для определения удельной стоимости тепловой энергии, произведённой потребителем, можно представить в следующем виде:

$$C_{\text{YA}} = \Pi / (\eta_{\text{пр}} \cdot k_{\text{т}}), \quad (3)$$

В табл. 2 в качестве частных примеров применения выражения (3) представлены расчётные зависимости для оценки удельной стоимости тепловой энергии преобразователей, представленных в табл. 1.

Следует отметить, что стоимостные составляющие ($\Pi_{\text{з}}$, $\Pi_{\text{т}}$, $\Pi_{\text{пар}}$) могут существенно изменяться как за время эксплуатационного периода, так и в зависимости от региональных экономических факторов [17]. В связи с этим актуальной задачей является также оценка энергетического совершенства рассматриваемых вариантов преобразователей, кри-

терием которого может являться их КПД (табл. 3). При этом очевидным условием целесообразности замены преобразователей печного типа на ТН является следующее:

$$\eta_{\text{прi}} \cdot k_{\text{ти}} > \eta_{\text{п}}. \quad (4)$$

Поскольку, в отличие от печей, КПД любого типа ТН определяется несколькими составляющими потерь, то условие (4) в подавляющем большинстве случаев должно обеспечиваться соответствующей величиной коэффициента преобразования (табл. 3). В общем случае корректное сравнение различных типов ТН целесообразно выполнять при одинаковой для всех вариантов величине $k_{\text{ти}}$ (табл. 2); представленные в табл. 3 зависимости позволяют определять границы применимости отдельных типов ТН.

Представленные выше соотношения наглядно отражают качественную взаимосвязь технико-экономических характеристик преобразователя и формальные условия целесообразности замены печного типа преобразователей на ТН. Однако для принятия проектных решений важно понимать количественное соотношение и значимость отдельных факторов, учитываемых в этой методике.

Результаты расчёта и их анализ

Для определения наиболее перспективных технических решений ТН — преобразователей выполним сравнительную оценку их энергетической и экономической эффективности при фиксированной величине коэффициента преобразования (в качестве примера примем $k_{\text{т2-6}} = 4$, $k_{\text{т1}} = 1$) (табл. 2), при фиксированной стоимости энергии от дополнительного внешнего источника и при среднестатистических величинах КПД применяемого оборудования (табл. 1): печи — 0,65...0,97; электродвигатели — 0,7...0,95; компрессоры — 0,6...0,8; теплообменное оборудование — 0,6...0,95; двигатель Ренкина — 0,3...0,35; турбина — 0,5...0,9; дизель —

Таблица 4. Сравнительная оценка энергетического совершенства преобразователей по величине КПД
Table 4. Comparative assessment of the energy performance of the Converters in terms of efficiency

Преобразователь	Печь	ТН2	ТН3	ТН4	ТН5	ТН6
Печь	1,00	0,4...0,8	0,1...0,3	0,1...0,3	0,1...0,3	0,3...0,7
ТН2	2,6...1,3	1,0	0,3...0,4	0,3...0,4	0,2...0,4	0,7...0,9
ТН3	9,6...3,6	3,7...2,6	1,0	1,0...0,9	1,0...0,9	2,5
ТН4	9,2...3,8	3,6...2,8	0,9...1,0	1,0	0,9...1,0	2,5
ТН5	10,0...3,8	3,9...2,9	1,0...1,1	1,1...1,0	1,0	2,5
ТН6	3,6...1,4	1,4...1,1	0,4	0,4	0,4	1,00

Таблица 5. Сравнительная оценка энергетического совершенства преобразователей без учёта и с учётом k_T
Table 5. Comparative assessment of the energy performance of Converters without and with k_T

Преобразователь	ТН2	ТН3	ТН4	ТН5	ТН6
КПД/КПД _{печь}	0,4...0,8	0,1...0,3	0,1...0,3	0,1...0,3	0,3...0,7
(КПД· k_T)/КПД _{печь}	1,5...2,9	0,4...1,1	0,4...1,1	0,4...1,0	1,1...2,8

Таблица 6. Сравнительная оценка экономической эффективности преобразователей
Table 6. Comparative evaluation of the economic efficiency of Converters

Преобразователь	Печь	ТН2	ТН3	ТН4	ТН5	ТН6
Печь	1,0	2,6...1,4	2,4...0,9	2,3...0,9	11,1...1,8	0,9...0,4
ТН2	0,4...0,7	1,0	0,9...0,7	0,9...0,7	1,1...0,8	0,4...0,3
ТН3	0,4...1,1	1,1...1,5	1,0	0,9...1,0	1,9...2,0	0,4
ТН4	0,4...1,1	1,1...1,4	1,0...0,9	1,0	2,0...1,9	0,4
ТН5	0,1...0,6	0,9...1,2	0,50	0,50	1,0	0,2
ТН6	1,1...2,8	2,9...3,8	2,7...2,5	2,6...2,7	5,0...4,8	1,0

или турбогенератор — 0,27...0,38 (наименьшие значения КПД характерны для оборудования малой мощности, наибольшее значения — для крупного энергетического оборудования [18–28]). В табл. 4 в индивидуальном столбце для каждого типа преобразователей приведено отношение величины его КПД к величине КПД других типов преобразователей; в табл. 5 — в индивидуальном столбце для каждого типа преобразователя показано, как при учёте коэффициента преобразования изменяется его энергоэффективность по отношению к энергоэффективности преобразователя печного типа (соотношение энергоэффективности преобразователей 2–6 между собой не изменяется, так как величина k_T для них одинакова).

Из результатов, представленных в табл. 4, видно, что, с точки зрения КПД рассматриваемого оборудования, при замене печей на парокompрессионные ТН наименее предпочтительными вариантами являются ТН3, ТН4 и ТН5, а наиболее предпочтительным — ТН2, что соответствует структуре энергетических потерь (табл. 3). Вариант ТН6 в общем случае имеет более высокий КПД, чем ТН3, ТН4 и ТН5. При этом, применительно к крупному производству, между многими из рассматриваемых типов ТН нет принципиального отличия, например, между ТН6 и ТН2 или между ТН3, ТН4 и ТН5. Во всех рассмотренных случаях КПД печей остаётся наилучшим. Однако при учёте величины коэффициента преобразования применение печей становится уже не таким привлекательным, и наиболее предпочтительными, с точки зрения обеспечения энергоэффективности в целом, могут стать, например, варианты ТН2 и ТН6 (табл. 6).

При решении задач по модернизации реального производства оценки технического совершенства того или иного типа преобразователя недостаточно; необходимо учесть стоимость различных видов применяемой в технологических процессах энергии. Рассмотрим пример сравнительной оценки экономической эффективности преобразователей при следующей ориентировочной стоимости энергоносителей [17]: коммерческая электроэнергия — 3 руб/кВт; газовое топливо — 9000 руб/т или 0,75 руб/кВт; коммерческий пар — 1000 руб/Гкал или 0,86 руб/кВт. В табл. 6 в индивидуальном столбце для каждого типа преобразователей приведено отношение величины удельной стоимости вырабатываемой им тепловой энергии к величине удельной стоимости тепловой энергии, вырабатываемой другими типами преобразователей.

Как видно из представленных в табл. 6 результатов, относительно высокая стоимость электроэнергии приводит к тому, что наиболее предпочтительной ТН — технологией, с точки зрения экономической эффективности, становится вариант ТН6, имеющий более высокий КПД по сравнению с вариантами ТН3, ТН4, ТН5 и использующий более дешёвое топливо по сравнению с вариантами ТН2 и ТН5. При этом применение преобразователя печного типа и ТН с электроприводом может стать неактуальным.

Известно, что величина коэффициента преобразования зависит от таких факторов, как свойства рабочего тела, величина и соотношения температур источника и потребителя тепловой энергии, величина переохлаждения рабочего тела после конденсатора, величины показателя политропы процесса

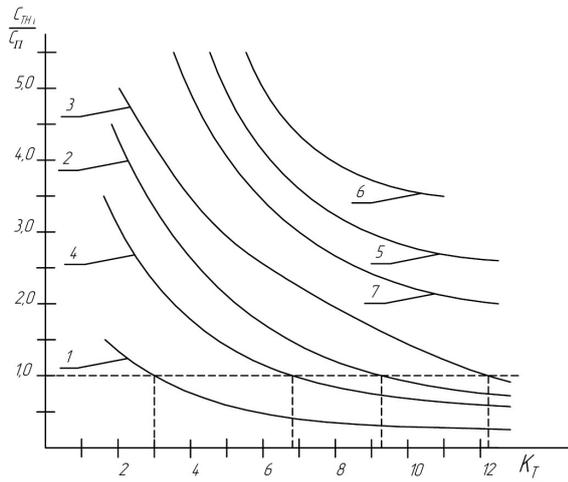


Рис. 2. Влияние величины коэффициента преобразования на относительную себестоимость тепловой энергии для некоторых типов ТН:

- 1 — $C_{ТН6}/C_{печи}$ при $Ц_6/Ц_{т1} = 1$; 2 — $C_{ТН2}/C_{печи}$ при $Ц_3/Ц_{т1} = 4$;
 3 — $C_{ТН2}/C_{печи}$ при $Ц_5/Ц_{т1} = 5$; 4 — $C_{ТН2}/C_{печи}$ при $Ц_3/Ц_{т1} = 3$;
 5 — $C_{ТН5}/C_{печи}$ при $Ц_{пар}/Ц_{т1} = 1,15$; 6 — $C_{ТН5}/C_{печи}$ при $Ц_{пар}/Ц_{т1} = 1,44$; 7 — $C_{ТН5}/C_{печи}$ при $Ц_{пар}/Ц_{т1} = 0,86$
- Fig. 2. Influence of the value of the conversion factor on the relative cost of thermal energy for some types of HP:
- 1 — $C_{ТН6}/C_h$ at $C_6/C_{t1} = 1$; 2 — $C_{ТН2}/C_h$ at $C_3/C_{t1} = 4$;
 3 — $C_{ТН2}/C_h$ at $C_5/C_{t1} = 5$; 4 — $C_{ТН2}/C_h$ at $C_3/C_{t1} = 3$;
 5 — $C_{ТН5}/C_h$ at $C_{vap}/C_{t1} = 1,15$; 6 — $C_{ТН5}/C_h$ at $C_{vap}/C_{t1} = 1,44$;
 7 — $C_{ТН5}/C_h$ at $C_{vap}/C_{t1} = 0,86$

сжатия рабочего тела и в общем случае может принимать значение в диапазон от немногим больше 1 до значений, значительно превышающих 10 [4–6, 8, 9, 13, 29, 30]. Стоимостные показатели зависят от рыночных условий и также могут изменяться в зависимости от региона и в течение времени эксплуатации ТН [17]. В связи с этим необходимо оценить влияние этих факторов на изменение удельной себестоимости вырабатываемой тепловой энергии для ТН при их фиксированных КПД. На рис. 2 представлены примеры расчёта изменения отношения средней удельной себестоимости тепловой энергии, вырабатываемой некоторыми типами ТН, к средней удельной себестоимости тепловой энергии, вырабатываемой преобразователем печного типа в зависимости от изменения величины коэффициента преобразования при различных соотношениях цен на энергоносители.

Таблица 7. Условные обозначения и индексы
 Table 7. Symbols and indexes

Обозначение	Наименование	Единица измерения
ТН	Тепловой насос	
$Q_{ц'}$, $Q_{ц}$, $Q_{внеш}$	Тепловая мощность потребителя, источника, дополнительная внешняя энергия	Вт
Q	Тепловая мощность преобразователя	Вт
C	Стоимость вырабатываемой тепловой энергии	руб
$Ц, Ц_3, Ц_5, Ц_{пар}$	Цена 1 кВт подводимой энергии (э — электроэнергия, т — газовое топливо, пар — коммерческий пар)	руб/кВт
$C_{уд}$	Удельная стоимость вырабатываемой тепловой энергии	руб/кВт
$\eta_{п'}$, $\eta_{т'}$, $\eta_{к'}$, $\eta_{гг'}$, $\eta_{дв'}$, $\eta_{гпар}$, $\eta_{гдв}$	КПД печи, теплообменника, компрессора, электрогенератора (на базе ГПУ или ГТУ), двигателя и теплообменника в цикле Ренкина, газотурбинного двигателя	
$\eta_{пр}$	КПД преобразователя	
k_T	Коэффициент трансформации (преобразования) ТН	

Как видно из представленных на рис. 2 результатов, величина коэффициента преобразования существенно влияет на экономическую целесообразность замены преобразователя печного типа на тот или иной тип ТН. Увеличение k_T с 2 до 12 может обеспечить снижение относительной себестоимости выработанной парокompрессионным ТН тепловой энергии примерно в 6 раз. При k_T более 4,5 удельная себестоимость теплопроизводительности парокompрессионного насоса типа ТН6 становится меньше себестоимости теплопроизводительности печи в 2...5 раз. С учётом того, что величина k_T во многом определяется температурами источника и потребителя тепловой энергии [4–6, 8, 9, 13, 29, 30], при решении вопросов повышения энергоэффективности высокотемпературных технологических систем логично предположить, что парокompрессионные ТН более предпочтительны, так как могут обеспечить возможность реализации широкого диапазона температурных режимов. Причём в некоторых случаях увеличение k_T возможно в том числе и за счёт повышения термодинамической эффективности рабочих процессов компрессорного агрегата [13]. Полученные результаты подтверждают также определяющее влияние типа (варианта конструктивного исполнения) парокompрессионного ТН — преобразователя и фактической коммерческой стоимости энергоносителей на величину относительной себестоимости выработки тепловой энергии.

Выводы и заключение

В настоящее время для многих крупных предприятий с развитой теплоэнергетической системой, к числу которых прежде всего следует отнести химические, металлургические, нефте- и газоперерабатывающие предприятия, реализующие энергоёмкие технологии переработки ископаемого сырья и его компонентов, становится всё более актуальной задача замены устаревшего печного оборудования на более эффективные преобразователи энергии. Одним из возможных вариантов таких преобразователей являются парокompрессионные ТН, позволяющие реализовать наиболее перспективные энергосберегающие технологии.

Ожидаемый энергетический эффект от предполагаемой модернизации производства определяется достигаемой величиной коэффициента преобразования и максимальным КПД парокompрессионного

ТН. Поскольку сравнительный анализ корректно производить при одинаковом для всех ТН коэффициенте преобразования, с технической точки зрения, наиболее предпочтительным является вариант ТН с непосредственным электроприводом. Его реализация обеспечивает максимальную энергоэффективность (максимальный КПД), простоту и надёжность конструкции, удобство эксплуатации.

Однако, в связи с существенно более высокими ценами на электроэнергию (по сравнению с газовым топливом и коммерческим паром), максимальный экономический эффект в общем случае может быть достигнут при использовании варианта парокompрессионного ТН с приводом от газовой турбины или ДВС.

Расчётный анализ показал, что в этом случае при величине коэффициента преобразования более 6 себестоимость производства тепловой энергии ТН снизится более чем в три раза по отношению к себестоимости тепловой энергии, вырабатываемой в печи.

Следует отметить, что применительно к реальным технико-экономическим условиям указанный ожидаемый эффект может оказаться существенно выше. Так, например, приведённый пример расчётов производился при условии высокой эффективности нагревательных устройств (для мощных печей КПД принимался равным около 0,9), тогда как на многих химических и нефтеперерабатывающих предприятиях в эксплуатации до сих пор находятся морально и физически устаревшие шатровые печи, КПД которых не превышает 0,5. В случае использования для газотурбинного привода ТН технологических отдувочных газов, использование которых в замкнутом технологическом цикле не всегда возможно, ожидаемый экономический эффект также возрастет.

Таким образом, при реализации проекта по модернизации производства путём замены устаревших печей на высокоэффективные ТН появляется возможность комплексного решения вопросов энергосбережения, экологической безопасности и снижения эксплуатационных затрат, связанных с ремонтом и обслуживанием устаревшего оборудования.

Необходимо подчеркнуть, что при любом варианте модернизации должен быть обеспечен максимально высокий технический уровень функциональных компонентов ТН для расширенного диапазона рабочих температур, давлений и рабочих тел. Однако предлагаемое на рынке оборудование далеко не всегда соответствует актуальным потребностям современного производства.

В связи с этим становится всё более очевидной необходимость постановки задач не только перед энергетиками, но и перед машиностроителями; делает стратегически актуальными разработку и реализацию целевых программ по обеспечению технологической независимости РФ в области производства энергосберегающего оборудования и перспективных энергетических систем на их базе.

Список источников

1. Шесть ключевых задач в экономике России на 2023 год. Стенограмма выступления Владимира Путина на заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma/> (дата обращения: 16.12.2022).

2. Плотникова Л. В., Чиликова И. И., Валиев Р. Н. [и др.]. Организация системы преобразования вторичной тепловой энергии с использованием теплонасосного оборудования для нефтегазоперерабатывающего предприятия Восточной нефтяной компании // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 11. С. 86–90.

3. Янговский Е. И., Левин А. А. Промышленные тепловые насосы. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 125 с.

4. Захаров М. К. Сравнение эффективности применения различных вариантов теплового насоса // Химическая промышленность. 2002. № 8. С. 1–7.

5. Шомова Т. П. Повышение энергетической эффективности газоперерабатывающих предприятий на основе применения тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2014. 20 с.

6. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. Москва: Энергоиздат, 1982. 224 с.

7. Trott A. R., Welch T. Refrigeration and Air-Conditioning. 3rd ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000. 377 p.

8. 13th IEA Heat Pump Conference 2021 / Conference Proceedings — Full Papers. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/13th-iea-heat-pump-conference-2021-conference-proceedings-full-papers/> (дата обращения: 18.10.2022).

9. Елистратов С. Е. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2011. 40 с.

10. Дуванов С. А. Исследование тепловых насосов на режимах, отличных от номинального, при сохранении выходных параметров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2006. 21 с.

11. Кошкин Н. Н., Ткачёв А. Г., Бадьякес И. С. [и др.]. Холодильные машины. Ленинград: Машиностроение, 1973. 521 с.

12. Гашо Е. Г., Козлов С. А., Пузаков В. С. [и др.]. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре. Информационно-методическое издание. Москва: Изд-во Перо, 2016. 204 с.

13. Юша В. Л., Громов А. Ю., Ушаков П. В. Анализ влияния температурных режимов поршневой длинноходовой компрессорной ступени на термодинамическую эффективность теплового насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 18–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25.

14. Бучко Н. А., Гоголин А. А., Латышев В. П. [и др.]. Теплофизические основы получения искусственного холода. Справочник. Москва: Пищевая промышленность, 1980. 232 с.

15. Гаимова Л. В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. 226 с.

16. Горшков В. Г., Паздников А. Г., Мухин Д. Г. [и др.]. Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения. URL: <http://teplosibmash.ru/> (дата обращения: 20.01.2023).

17. Романюк В. Н., Бобич А. А., Муслина Д. Б. [и др.]. Абсорбционные тепловые насосы в теплоэнергетических системах промышленных предприятий для снижения энергетических и финансовых затрат // Энергия и менеджмент. 2013. № 2 (71). С. 32–37.

18. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

19. Юша В. Л., Чернов Г. И. Термодинамический анализ эффективности мобильных компрессорных установок с рекуперацией тепловых потерь. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 102 с.

20. Луканин В. Н., Алексеев И. В., Шатров М. Г. [и др.]. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов. 3-е изд., перераб. и испр. Москва: Высшая школа, 2007. 479 с.

21. Архаров А. М., Архаров И. А., Афанасьев В. Н. [и др.]. Теплотехника. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 712 с.
22. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Москва: Изд-во МЭИ, 2009. 580 с.
23. Селиверстов В. М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. Ленинград: Судостроение, 1973. 256 с.
24. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селиверстов В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. Москва: Машиностроение, 1989. 366 с.
25. Справочник по теплообменникам. В 2 т. / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 352 с.
26. Сазанов Б. В., Ситас В. И. Промышленные теплоэнергетические установки и системы. Москва: Издат. дом МЭИ, 2004. 275 с.
27. Нефтегазовое оборудование. URL: <https://salus-ural.ru/wp-content/uploads/2016/10/catalog> (дата обращения: 21.01.2023).
28. Каталог технологических печей производства ООО НПП «НОУПром» URL: <http://noupprom-nprz.ru> (дата обращения: 21.01.2023).
29. Малафеев И. И., Ильин Г. А., Крысанов К. С. Рабочие тела высокотемпературных тепловых насосов. Современное состояние вопроса и направления развития // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 3, № 3 (21). С. 53–58.
30. Bosnjakovic F., Knoche K. F. Technische Thermodynamik. Teil I. Darmstadt; Steinkopff, 1998. 543 s.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), Омский государственный технический университет, г. Омск.
SPIN-код: 1503-9666
ORCID: 0000-0001-9858-7687
AuthorID (SCOPUS): 6505861937
ResearcherID: J-8079-2013
Адрес для переписки: 1978yusha@mail.ru
СУТЯГИНСКИЙ Михаил Александрович, председатель совета директоров АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.
ПОТАПОВ Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный специалист департамента по развитию и новым технологиям АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

Для цитирования

Юша В. Л., Сутягинский М. А., Потапов Ю. А. Сравнительная оценка энергетической и экономической эффективности парокompрессионных тепловых насосов при модернизации крупного химического и нефтеперерабатывающего производства. Часть 1 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 36–44. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-36-44.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023 г.
© В. Л. Юша, М. А. Сутягинский, Ю. А. Потапов

COMPARATIVE EVALUATION OF THE ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF VAPOR COMPRESSION HEAT PUMPS IN MODERNIZATION OF LARGE CHEMICAL AND OIL REFINING INDUSTRIES. PART 1

V. L. Yusha¹, M. A. Sutyaginskiy², Yu. A. Potapov²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²JSC «Group of companies «Titan»,
Russia, Omsk, Gubkin Ave., 30, 644035

The question of the feasibility of increasing the energy efficiency of large chemical and oil refining industries by replacing furnace heaters of process heat carriers and raw materials with vapor compression heat pumps is considered. An analysis of the relationship between the technical configuration of vapor-compression heat pumps, the operating parameters of their operation (determining the value of the energy conversion coefficient) and the ratio of the cost of various energy carriers is carried out.

The presented results of a comparative analysis of the energy efficiency of various options for replacing a furnace with a vapor compression heat pump reflect the decisive influence of the technical level and design configuration of a vapor compression heat pump on the choice of the preferred upgrade option. However, a significant difference in commercial energy prices significantly changes the preferred ranking of these options.

Keywords: energy converter, vapor compression heat pump, heater, energy conversion factor, efficiency factor, gas fuel, steam, electricity, unit cost of thermal energy.

References

1. Shest' klyuchevykh zadach v ekonomike Rossii na 2023 god. Stenogramma vystupleniya Vladimira Putina na zasedanii Soveta po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym projektam [Six key tasks in the Russian economy for 2023. Transcript of Vladimir Putin's speech at a meeting of the Council for Strategic Development and National Projects]. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma/> (accessed: 16.12.2022). (In Russ.).
2. Plotnikova L. V., Chilikova I. I., Valiyev R. N. [et al.]. Organizatsiya sistemy preobrazovaniya vtorichnoy teplovy energii s ispol'zovaniyem teplonasosnogo oborudovaniya dlya neftegazopererabatyvayushchego predpriyatiya Vostochnoy neftyanoy kompanii [Organization of a system for converting secondary thermal energy using heat pump equipment for an oil and gas refinery of the eastern oil company] // Territoriya «NEFTEGAZ». *Territoriya «NEFTEGAZ»*. 2018. No. 11. P. 86–90. (In Russ.).
3. Yantovskiy E. I., Levin L. A. Promyshlennyye teplovy nasosy [Industrial heat pumps]. Moscow, 1989. 125 p. (In Russ.).
4. Zakharov M. K. Sravneniye effektivnosti primeneniya razlichnykh variantov teplovogo nasosa [Comparison of the efficiency of different heat pump options] // *Khimicheskaya promyshlennost'*. *Chemical Industry*. 2002. No. 8. P. 1–7. (In Russ.).
5. Shomova T. P. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti gazopererabatyvayushchikh predpriyatii na osnove primeneniya teplovykh nasosov [Improving the energy efficiency of gas processing plants through the use of heat pumps]. Ivanovo, 2014. 20 p. (In Russ.).
6. Rey D., Makmayl D. Teplovy nasosy [Heat pumps]. Moscow, 1982. 224 p. (In Russ.).
7. Trott A. R., Welch T. Refrigeration and Air-Conditioning. 3rd ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000. 377 p. (In Engl.).
8. 13th IEA Heat Pump Conference 2021 / Conference Proceedings – Full Papers. URL: <https://heatpumpingtech-nologies.org/publications/13th-iea-heat-pump-conference-2021-conference-proceedings-full-papers/> (accessed: 18.10.2022). (In Engl.).
9. Elistratov S. E. Kompleksnoye issledovaniye effektivnosti teplovykh nasosov [Comprehensive study of heat pump efficiency]. Novosibirsk, 2011. 40 p. (In Russ.).
10. Duvanov S. A. Issledovaniye teplovykh nasosov na rezhimakh, otlichnykh ot nominal'nogo, pri sokhraneni vykhodnykh parametrov [Investigation of heat pumps at modes other than nominal while maintaining output parameters]. Astrakhan, 2006. 21 p. (In Russ.).
11. Koshkin N. N., Tkachev A. G., Badyl'kes I. S. [et al.]. Kholodil'nyye mashiny [Refrigeration machines]. Leningrad, 1985. 521 p. (In Russ.).
12. Gasho E. G., Kozlov S. A., Puzakov V. S. [et al.]. Teplovy nasosy v sovremennoy promyshlennosti i kommunal'noy infrastrukture [Heat pumps in modern industry and public infrastructure]. Moscow, 2017. 204 p. (In Russ.).
13. Yusha V. L., Gromov A. Yu., Ushakov P. V. Analiz vliyaniya temperaturnykh rezhimov porshnevoy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni na termodinamicheskuyu effektivnost' teplovogo nasosa [The analysis of influence of temperature conditions of piston long-stroke compressor stage on thermodynamic efficiency of a heat pump] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 18–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25. (In Russ.).
14. Buchko N. A., Gogolin A. A., Latyshev V. P. Teplofizicheskiye osnovy polucheniya iskusstvennogo kholoda. Spravochnik [Thermophysical bases for obtaining artificial cold. Handbook]. Moscow, 1980. 232 p. (In Russ.).
15. Galimova L. V. Absorbtsionnyye kholodil'nyye mashiny i teplovy nasosy [Absorption chillers and heat pumps]. Astrakhan, 1997. 226 p. (In Russ.).

16. Gorshkov V. G., Pazdnikov A. G., Mukhin D. G. [et al.]. Sevast'yanov Promyshlennyy opyt i perspektivy ispol'zovaniya otechestvennykh absorbtionnykh bromistolitiyevykh kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov novogo pokoleniya [Industrial experience and prospects for the use of domestic absorption lithium bromide refrigerating machines and heat pumps of a new generation]. URL: <http://teposibmash.ru/> (accessed: 20.01.2023). (In Russ.).

17. Romanyuk V. N., Bobich A. A., Muslina D. B. [et al.]. Absorbtsionnyye teplovyye nasosy v teploenergeticheskikh sistemakh promyshlennykh predpriyatiy dlya snizheniya energeticheskikh i finansovykh zatrat [Absorption heat pumps in heat and power systems of industrial enterprises to reduce energy and financial costs] // *Energiya i menedzhment. Energy and Management*. 2013. No. 2 (71). P. 32–37. (In Russ.).

18. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).

19. Yusha V. L., Chernov G. I. Termodinamicheskiy analiz effektivnosti mobil'nykh kompressornykh ustanovok s rekuperatsiyey teplovykh poter' [Thermodynamic analysis of the efficiency of mobile compressor units with heat loss recovery]. Omsk, 2014. 102 p. (In Russ.).

20. Lukanin V. N., Alekseyev I. V., Shatrov M. G. [et al.]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov [Internal combustion engines. In 3 bk. Bk. 1. Theory of work processes]. 3th ed., 2007. 479 p. (In Russ.).

21. Arkharov A. M., Arkharov I. A., Afanasyev V. H. [et al.]. Teplotekhnika [Heat Engineering]. Moscow, 2004. 712 p. (In Russ.).

22. Tsanev S. V., Burov V. D., Remezov A. N. Gazoturbinnyye i parogazovyye ustanovki teplovykh elektrostantsiy [Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants]. Moscow, 2009. 580 p. (In Russ.).

23. Seliverstov V. M. Utilizatsiya tepla v sudovykh dizel'nykh ustanovkakh [Heat recovery in marine diesel installations]. Leningrad, 1973. 256 p. (In Russ.).

24. Bazhan P. I., Kanevets G. E., Seliverstov V. M. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Handbook of heat exchangers]. Moscow, 1989. 366 p. (In Russ.).

25. Spravochnik po teploobmennikam. V 2 t. [Heat exchanger handbook. In 2 vols.] / Trans. from Engl. by ed. O. G. Martynenko [et al.]. Moscow, 1987. Vol. 2. 352 p. (In Russ.).

26. Sazanov B. V., Sitas V. I. Promyshlennyye teploenergeticheskiye ustanovki i sistemy [Industrial thermal power plants and systems]. Moscow, 2004. 275 p.

27. Neftegazovoye oborudovaniye [Oil and gas equipment]. URL: <https://salus-ural.ru/wp-content/uploads/2016/10/catalog> (accessed: 21.01.2023). (In Russ.).

28. Katalog tekhnologicheskikh pechey proizvodstva OOO NPP «NOUProm» [Catalog of technological furnaces produced by LLC NPP NOUprom]. URL: <http://nouprom-npz.ru> (accessed: 21.01.2023). (In Russ.).

29. Malafeyev I. I., Il'in G. A., Krysanov K. S. Rabochiye tela vysokotemperaturnykh teplovykh nasosov. Sovremennoye sostoyaniye voprosa i napravleniya razvitiya [Working substances of high heat pumps. current state of affair and development] // *Izvestiya MGTU «MAMI»*. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014. Vol. 3, no. 3 (21). P. 53–58. (In Russ.).

30. Bosnjakovic F., Knoche K. F. Technische Thermodynamik: Teil I. Darmstadt; Steinkopff, 1998. 543 s. (In Germ.).

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: 1978yusha@mail.ru

SUTYAGINSKIY Mikhail Alexandrovich, Chairman of the Board of Directors of Group of Companies «Titan» JSC, Omsk.

POTAPOV Yuri Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of Development and New Technologies Department of Group of Companies «Titan» JSC, Omsk.

For citations

Yusha V. L., Sutyaginskiy M. A., Potapov Yu. A. Comparative evaluation of the energy and economic efficiency of vapor compression heat pumps in modernization of large chemical and oil refining industries. Part 1 // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 36–44. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-36-44.

Received February 28, 2023.

© V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy, Yu. A. Potapov