

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; А. М. Слободянюк

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПО СРАВНЕНИЮ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

*Проанализирована энергетическая, экологическая и экономическая эффективность парокомпрессионных теплонасосных установок (ТНУ) с разными источниками низкотемпературной теплоты для систем теплоснабжения по сравнению с альтернативными источниками теплоснабжения. Определены значения годовой экономии условного топлива, оценены уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> и экономия средств на топливно-энергетических ресурсах и выбросах для ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода с использованием теплоты разных низкотемпературных источников.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, экономия условного топлива, экологическая эффективность, экономическая эффективность, теплонасосная установка.

### Введение

В течение последних десятилетий вопросам повышения уровня энергоэффективности энергопроизводства в мире и в Украине было посвящено немало публикаций в отраслевых изданиях [1 – 2]. Для Украины на сегодняшний день важно учесть основные современные проблемы, которые касаются развития топливно-энергетического комплекса: критическое состояние энергоресурсной базы; устаревшие оборудование и технологии добычи, переработки и сжигания органического топлива; низкий уровень энергоэффективности и экологической безопасности энергопроизводства; дефицит отечественных топливно-энергетических ресурсов; высокую стоимость импортированных энергоресурсов; рост экологических требований. Соглашаясь с объективностью данных проблем, необходимо разработать ряд срочных мероприятий, реализация которых позволит решить проблему обеспечения высокого уровня энергетической эффективности и экологической безопасности энергопроизводства и энергоиспользования.

Дальнейшее существенное повышение стоимости природного газа в Украине и увеличение тарифов на тепловую энергию способствуют поиску новых высокоэффективных источников теплоснабжения. Использование теплонасосных установок (ТНУ) в системах теплоснабжения будет способствовать экономии топлива и защите окружающей среды за счет снижения теплового загрязнения и количества вредных выбросов продуктов сгорания.

Для определения энергетической эффективности использования начальной энергии топлива и влияния определенного вида отопления на экологию Комиссией по тепловым насосам Европейского Экономического Сообщества (ЕЭС) в 1991 г. был проведен анализ систем отопления, распространенных в Европе. Результаты этого анализа показаны в табл. 1 [3]. Как видно из табл. 1, тепловые насосы обеспечивают высокую энергетическую эффективность начальной энергии и значительно меньшее количество выбросов углекислого газа по сравнению с альтернативными источниками теплоснабжения.

В последние годы проведен ряд исследований эффективности применения теплонасосных установок в тепловых схемах источников энергоснабжения. В работе [4] авторами выполнены исследования по повышению энергоэффективности источников теплоснабжения путем использования ТНУ с учетом влияния схемных решений и режимов работы. Оценку эффективности ТНУ проводили по таким критериям: экономия топлива по сравнению с существ-

вующей схемой, годовые расходы на топливо и электроэнергию, капиталовложения, себестоимость единицы теплоты, срок окупаемости, годовые приведенные затраты и прибыль. В [5] рассматривают схемы использования ТНУ на промышленных электростанциях. В исследовании [6] проанализирована эффективность ТНУ с электроприводом и с приводом от газотурбинной установки и котлом-утилизатором.

Таблица 1

Показатели систем отопления (по данным ЕЭС) [3]

Система отопления	Энергетическая эффективность начальной энергии, %	Выбросы CO <sub>2</sub> , кг/кВт
Электрическое отопление	35	0,55
Котел на жидком топливе, отопление горячей водой	80	0,29
Газовый котел, отопление горячей водой	90	0,21
Тепловой насос с электрическим приводом	110	0,22...0,14
Абсорбционный тепловой насос	130	0,17
Тепловой насос с приводом от газового двигателя	150	0,12

Авторами [7] проведены сравнительные исследования трех систем энергоснабжения по себестоимости теплоты (на базе газового котла, теплового насоса и когенерационной установки с тепловым насосом) при условии изменения стоимости электроэнергии и газа для разных групп потребителей. В работе [8] проведена оценка эффективности четырех источников теплоснабжения мощностью 3 МВт на базе электродвигателя, топливного котла (газ, жидкое топливо) и теплонасосной установки. Авторами [9] проведена оценка энергоэффективности теплонасосной установки малой мощности по сравнению с традиционными источниками теплоснабжения на базе электрического и газового котлов. В работе [10] оценена энергетическая и экологическая эффективность теплонасосных установок с разными источниками низкотемпературной теплоты для предприятий пищевой промышленности, определены и обоснованы рациональные температурные режимы работы ТНУ.

В работах [3 – 10] авторами не проведена оценка энергетической, экологической и экономической эффективности парокompрессионных ТНУ с разными видами привода в системах теплоснабжения по сравнению с альтернативными источниками теплоснабжения.

**Целью исследования** является определение энергетических и экологических преимуществ, а также экономических предпосылок применения парокompрессионных тепловых насосов с разными источниками теплоты для работы в системах теплоснабжения; оценка энергетической, экологической и экономической эффективности ТНУ по сравнению с альтернативными источниками теплоснабжения.

### Основная часть

В работе [10] определены рациональные температурные режимы работы парокompрессионных ТНУ, при которых достигается экономия условного топлива для разных источников низкотемпературной теплоты.

На основании этих результатов проводили исследование эффективности применения ТНУ тепловой мощностью 1 МВт с разными видами привода компрессора, на разных источниках низкотемпературной теплоты при условии круглогодичной работы ТНУ и переменных температурных режимов работы на протяжении года.

Исследование проводили методом математического моделирования работы ТНУ с ис-

пользованием программы в Excel. Энергетическую, экологическую и экономическую эффективность парокомпрессионных ТНУ сравнивали с эффективностью альтернативных источников теплоснабжения (газовой котельной и котельной на жидком топливе). Исследовали эффективность ТНУ с электроприводом, приводом компрессора от газопоршневого двигателя (ГПД) и от дизельного двигателя. Схемы указанных ТНУ приведены в работе [4].

Источниками низкотемпературной теплоты для ТНУ были: поверхностные и грунтовые воды, вода системы оборотного водоснабжения, геотермальные воды, воздух, промышленные тепловые выбросы, канализационные сточные воды и теплота грунта. Характеристика источников низкотемпературной теплоты приведена в работе [11].

Энергетическую эффективность ТНУ оценивали показателем экономии условного топлива. Оценивали расход условного топлива котельными (для альтернативных источников теплоснабжения), ТНУ с приводом от ГПД и от дизельного двигателя. Для ТНУ с электроприводом оценивали расход условного топлива при производстве электроэнергии на электростанциях.

Экономия условного и рабочего топлива от внедрения ТНУ в значительной степени определяется оптимально подобранными режимами работы ТНУ. Результаты исследований энергетической эффективности ТНУ при условии переменных режимов работы приведены в работе [12].

Исследования экономической эффективности ТНУ проводили для действующих значений стоимости энергоресурсов в Украине. Значения стоимости топливно-энергетических ресурсов, для которых проводили исследование, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Стоимость топливно-энергетических ресурсов

Значения стоимости топливно-энергетических ресурсов	Сфера внедрения ТНУ
Цена электроэнергии, грн./кВт·час	1,239
Цена природного газа, грн./тыс. м <sup>3</sup>	6266,98

Как уже отмечалось, кроме энергетических преимуществ, применение тепловых насосов приводит к уменьшению загрязнения окружающей среды и сокращению вредных выбросов в атмосферу. Для оценки экологической эффективности ТНУ преимущественно используют показатель снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> (см. табл. 1), поскольку он связан с экономической эффективностью ТНУ. Привлечение средств от продажи квот на выбросы CO<sub>2</sub>, согласно с Киотским протоколом, позволяет повысить экономическую эффективность внедрения ТНУ и сократить их срок окупаемости. В исследовании учтено, что дополнительные средства от продажи квот на выбросы CO<sub>2</sub> составляют 20 \$/т выбросов.

Оценено уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> при использовании ТНУ мощностью 1 МВт по сравнению с работой водогрейной котельной такой же мощности на природном газе. Учитывали выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании газа в котлах (для альтернативных источников теплоснабжения), при сжигании рабочего топлива в ГПД и дизельном двигателе (для привода компрессора ТНУ), а также выбросы CO<sub>2</sub> при производстве электроэнергии на электростанциях (для ТНУ с электроприводом). Для оценки количества выбросов CO<sub>2</sub> использовали статистические данные из исследования [3] (см. табл. 1).

Экономическую эффективность от внедрения ТНУ определяют как разницу эксплуатационных затрат замещающей водогрейной котельной и ТНУ. К эксплуатационным затратам при работе водогрейной котельной или ТНУ относят: затраты на топливо, электроэнергию, воду, амортизацию оборудования и текущий ремонт, заработную плату и другие затраты. Наиболее весомой составляющей в структуре эксплуатационных затрат и себестоимости тепловой энергии являются затраты на топливо (для котельных и ТНУ с приводом от ГПД или от дизельного двигателя) и электрическую энергию (для ТНУ с электроприводом). Значительное влияние на энергетическую и, как следствие, экономическую эффективность ТНУ оказывают режимы работы ТНУ и температурный уровень избранного источника низкотемпературной теплоты.

Исследования экономической эффективности проводили по укрупненным показателям. Для разных вариантов ТНУ оценивали экономию средств на топливно-энергетических ресурсах и выбросах  $\text{CO}_2$ . Для разных источников теплоты в ТНУ не учитывали расходы на сооружение систем отбора теплоты от низкотемпературного источника.

Предложенные критерии позволяют оценить энергетическую, экологическую и экономическую эффективность работы ТНУ на протяжении года.

На рис. 1 показаны значения годовой экономии условного топлива (в процентах) для ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода компрессора с использованием теплоты разных низкотемпературных источников.

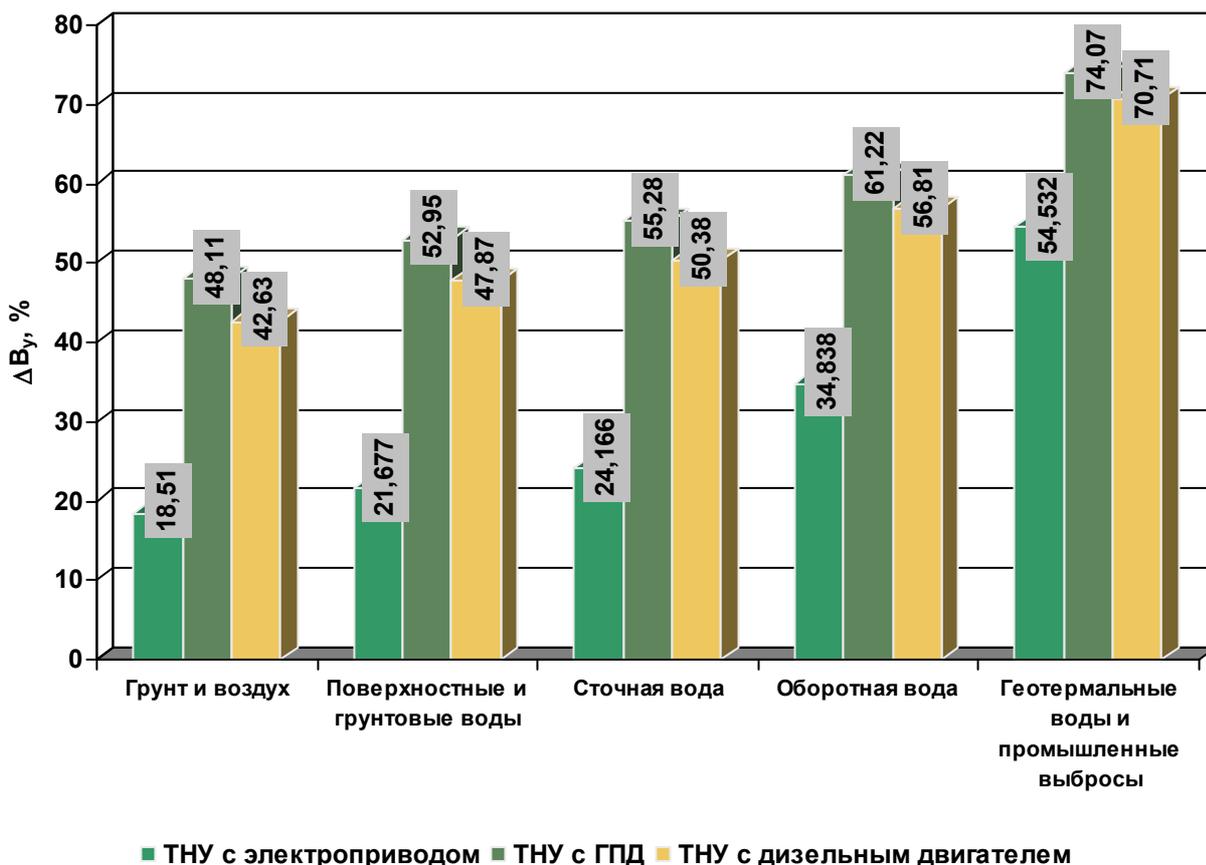


Рис. 1. Значения годовой экономии условного топлива (в процентах) для ТНУ с разными видами привода с использованием теплоты разных низкотемпературных источников

Как видно из рис. 1, для ТНУ с электроприводом экономия условного топлива составляет 18,51...54,53%; для ТНУ с приводом от ГПД – 48,11...74,07%; для ТНУ с приводом от дизельного двигателя – 42,63...70,71%. Наибольшие значения экономии условного топлива соответствуют таким источникам теплоты для ТНУ, как: обратная вода, геотермальные воды и промышленные тепловые выбросы, что обусловлено их высоким температурным уровнем.

На рис. 2 приведены значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с электроприводом на разных источниках низкотемпературной теплоты. Здесь также для сравнения показаны значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  котельной такой же мощности на газообразном топливе (ГК) и жидком топливе (ЖК). Учитывали выбросы  $\text{CO}_2$  при сжигании топлива в котлах, а также выбросы  $\text{CO}_2$  при производстве электроэнергии на электростанциях. Как видно из рис. 2, при использовании ТНУ с электроприводом фиксируют существенное снижение количества выбросов  $\text{CO}_2$  по сравнению с котельными.

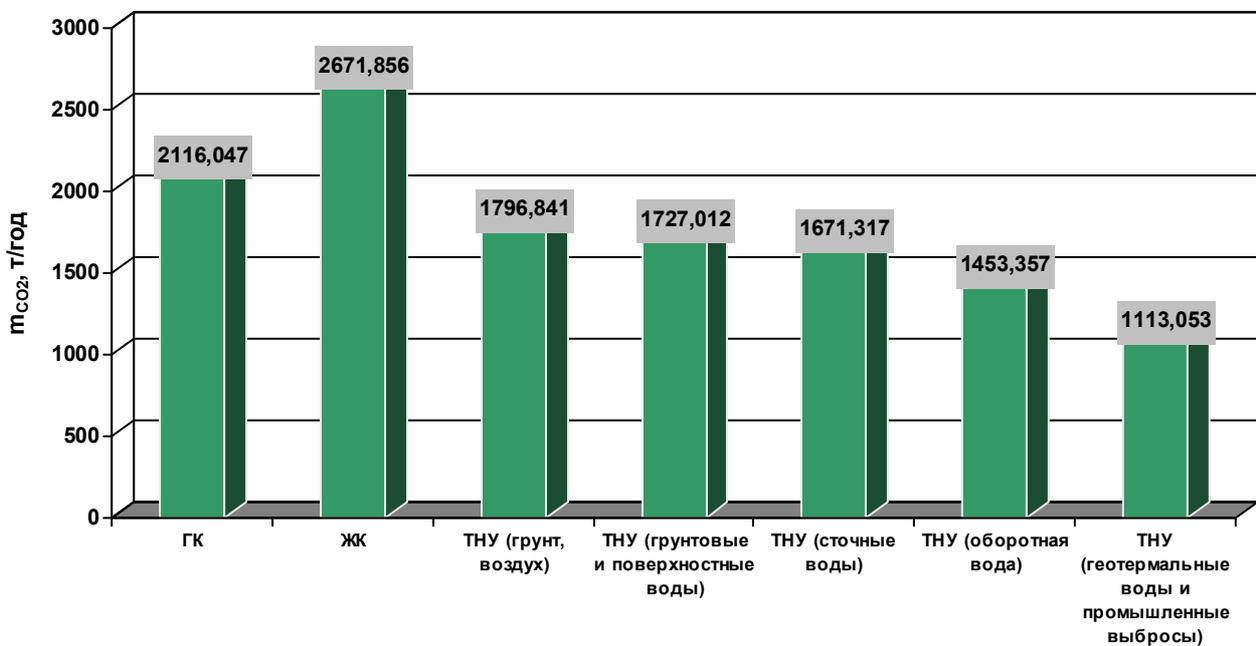


Рис. 2. Значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  котельными на газообразном и жидком топливе и ТНУ мощностью 1 МВт с электроприводом на разных источниках низкотемпературной теплоты

На рис. 3 показаны значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с приводом от ГПД на разных источниках низкотемпературной теплоты. Здесь для сравнения также показаны значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  котельной такой же мощности на газообразном топливе (ГК) и жидком топливе (ЖК). Как видно из рис. 3, при использовании ТНУ с приводом от ГПД фиксируют более существенное снижение годового количества выбросов  $\text{CO}_2$ , чем для ТНУ с электроприводом (см. рис. 2).

На рис. 4 приведены значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с приводом от дизельного двигателя на разных источниках низкотемпературной теплоты. Как и в предыдущих случаях, здесь для сравнения показаны значения годового количества выбросов  $\text{CO}_2$  котельной такой же мощности на газообразном топливе и жидком топливе. Как видно из рис. 4, в случае использования ТНУ с дизельным двигателем годовое количество выбросов  $\text{CO}_2$  является большим, чем для ТНУ с приводом от ГПД, но меньшим, чем для ТНУ с электроприводом.

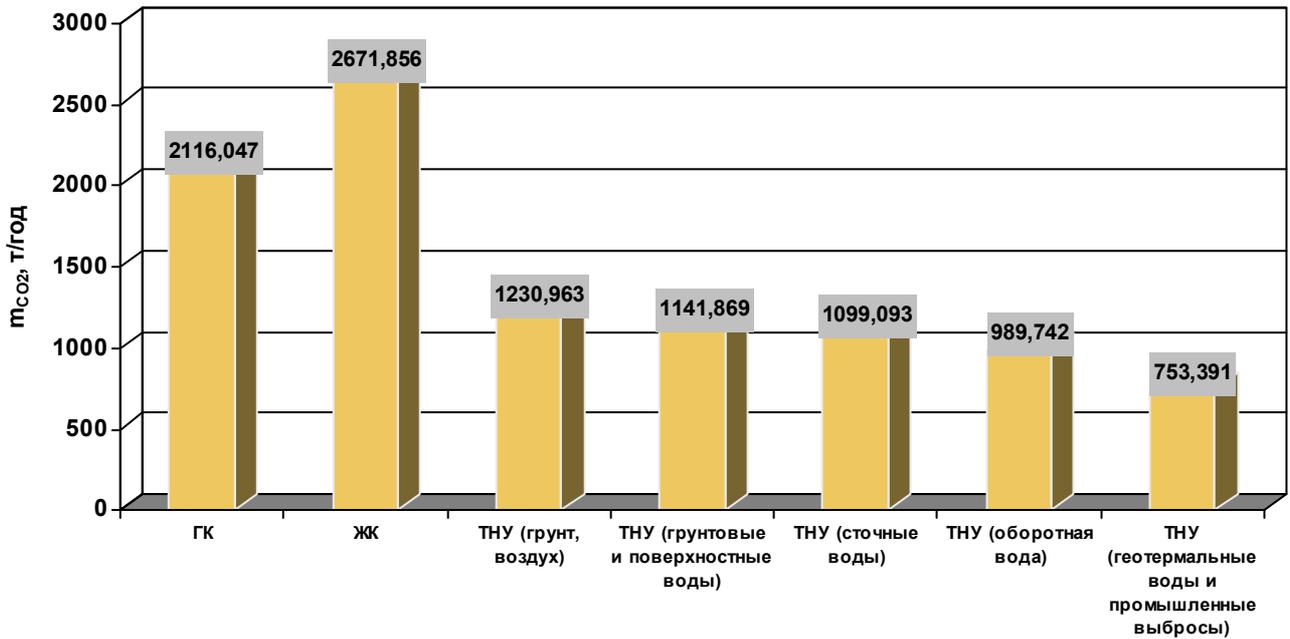


Рис. 3. Значения годового количества выбросов CO<sub>2</sub> котельными на газообразном и жидком топливе и ТНУ мощностью 1 МВт с приводом от ГПД, на разных источниках низкотемпературной теплоты

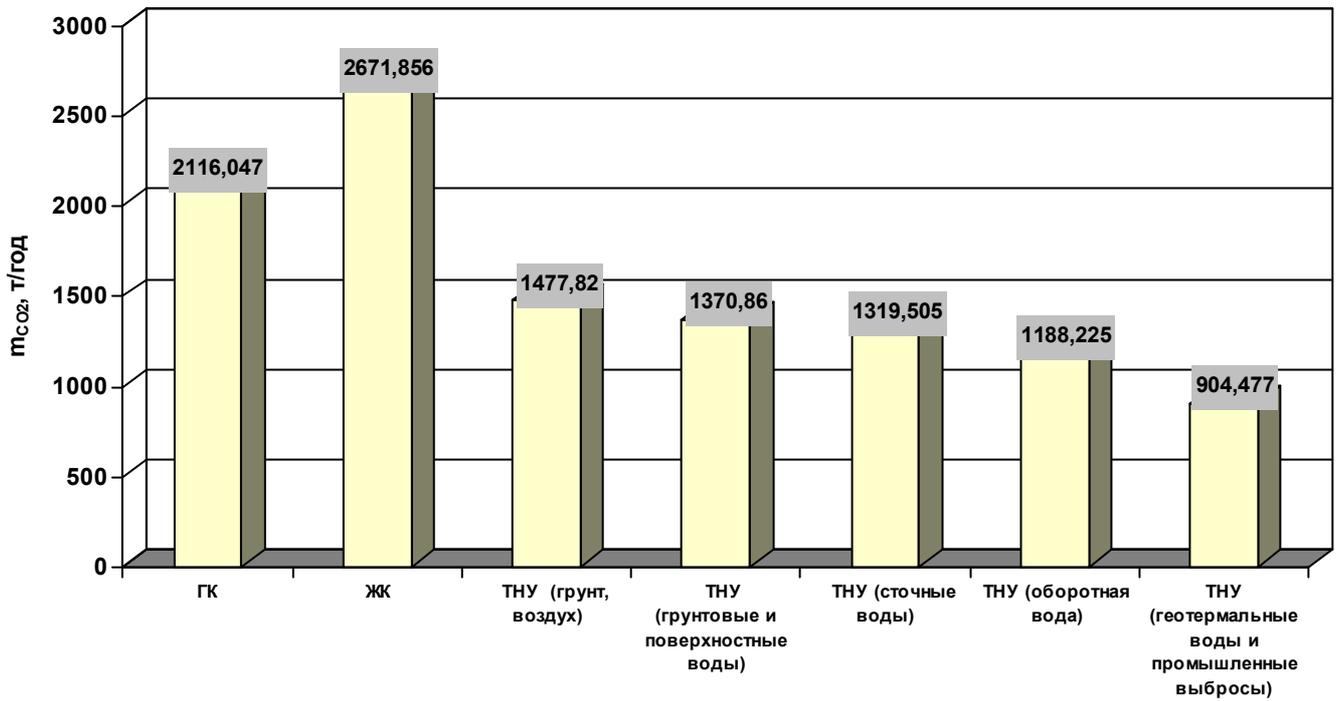


Рис. 4. Значения годового количества выбросов CO<sub>2</sub> котельными на газообразном и жидком топливе и ТНУ мощностью 1 МВт с дизельным приводом на разных источниках низкотемпературной теплоты

Как видно из рис. 2 – 4, ТНУ оказывают на окружающую среду значительно меньшее влияние, чем котельные.

На рис. 5 показаны значения годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода компрессора, на разных источниках низкотемпературной теплоты. Наибольшие значения годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> соответствуют таким источникам теплоты для ТНУ, как: обратная вода, геотермальные воды и промышленные тепловые выбросы. Это обусловлено высоким температурным уровнем указанных источников низкотемпературной теплоты, и, как следствие, высокой энергетической эффективностью ТНУ в случае использования этих источников низкотемпературной теплоты.

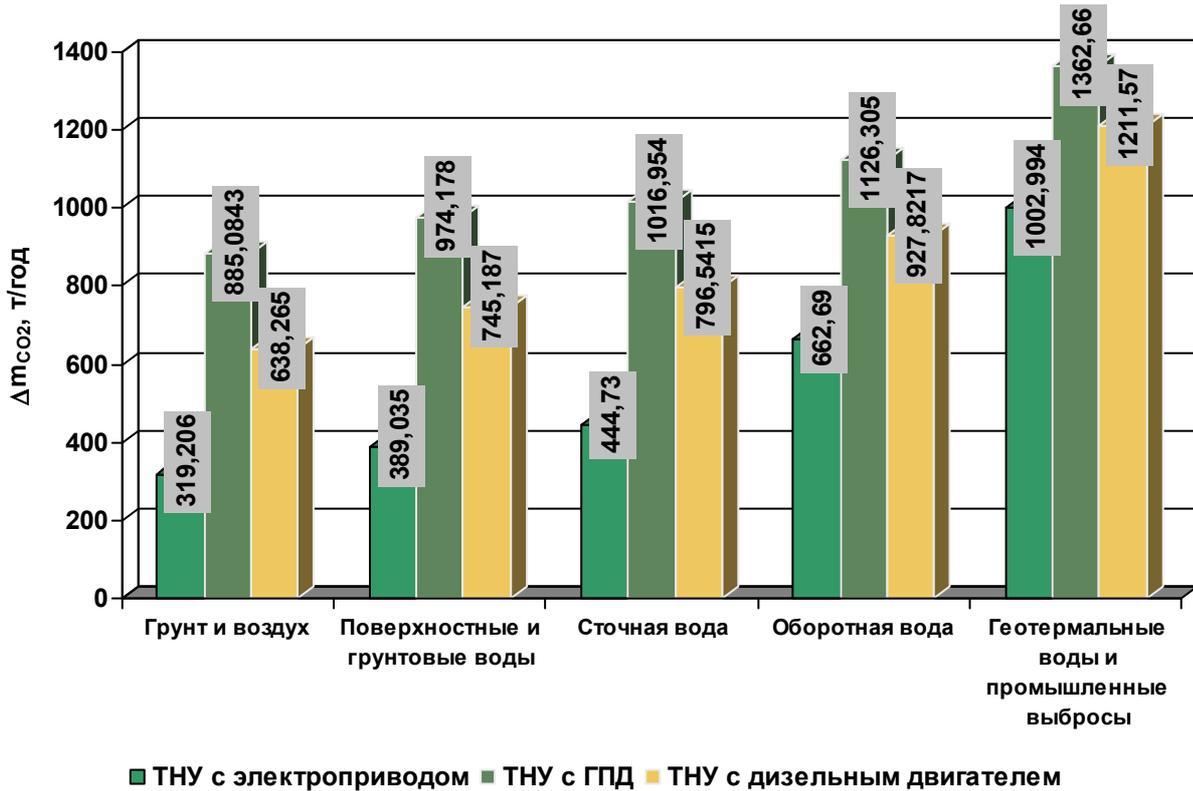


Рис. 5. Значения годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода компрессора, на разных источниках низкотемпературной теплоты

На рис. 6 приведены значения годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> (в процентах) для случаев использования ТНУ с разными видами привода на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной. Из рис. 6 видно, что для ТНУ с разными видами привода для всех исследованных источников низкотемпературной теплоты обеспечивается снижение количества выбросов CO<sub>2</sub>.

На рис. 7 показаны значения годовой экономии средств ΔE<sub>в</sub> на выбросах CO<sub>2</sub> при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной. В зависимости от избранного варианта применения ТНУ годовая экономия средств на выбросах CO<sub>2</sub> будет составлять от 76,609 до 327,037 тыс. грн./год.

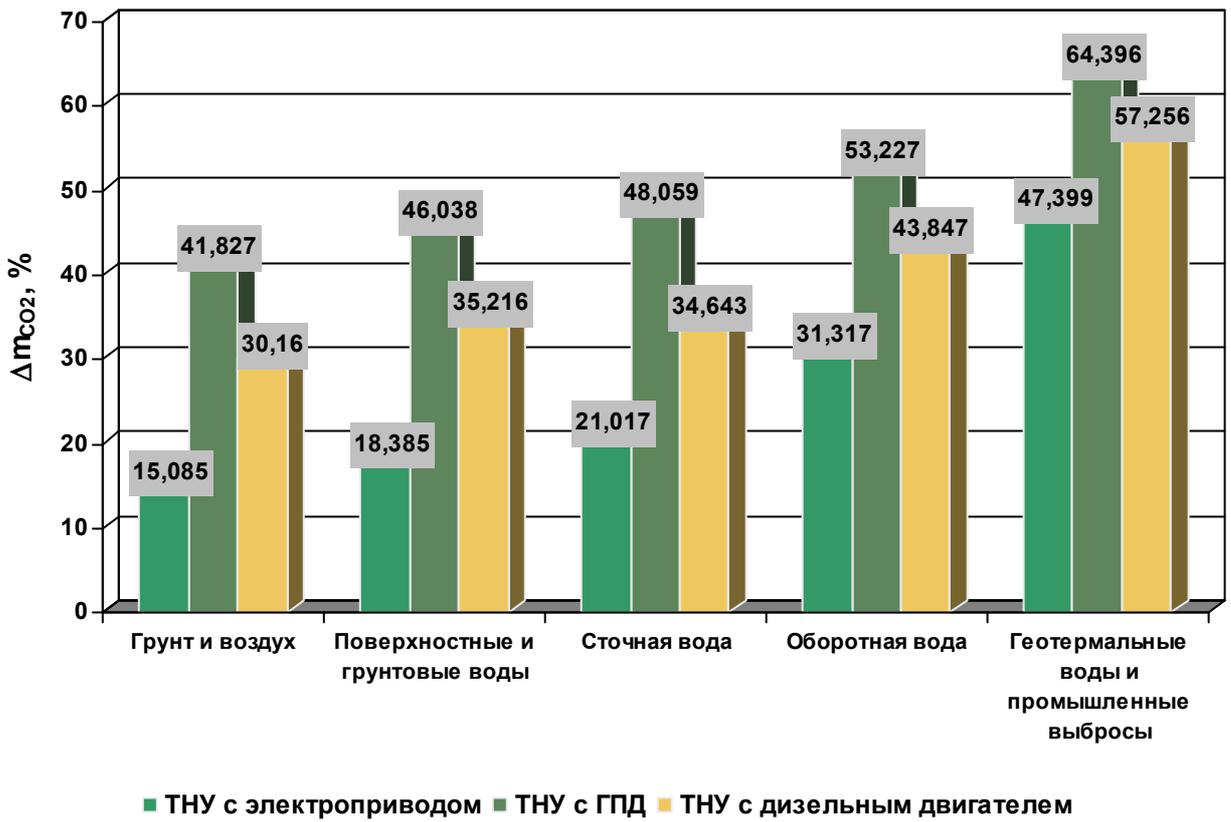


Рис. 6. Значения годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub> (в процентах) для случаев использования ТНУ с разными видами привода на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной

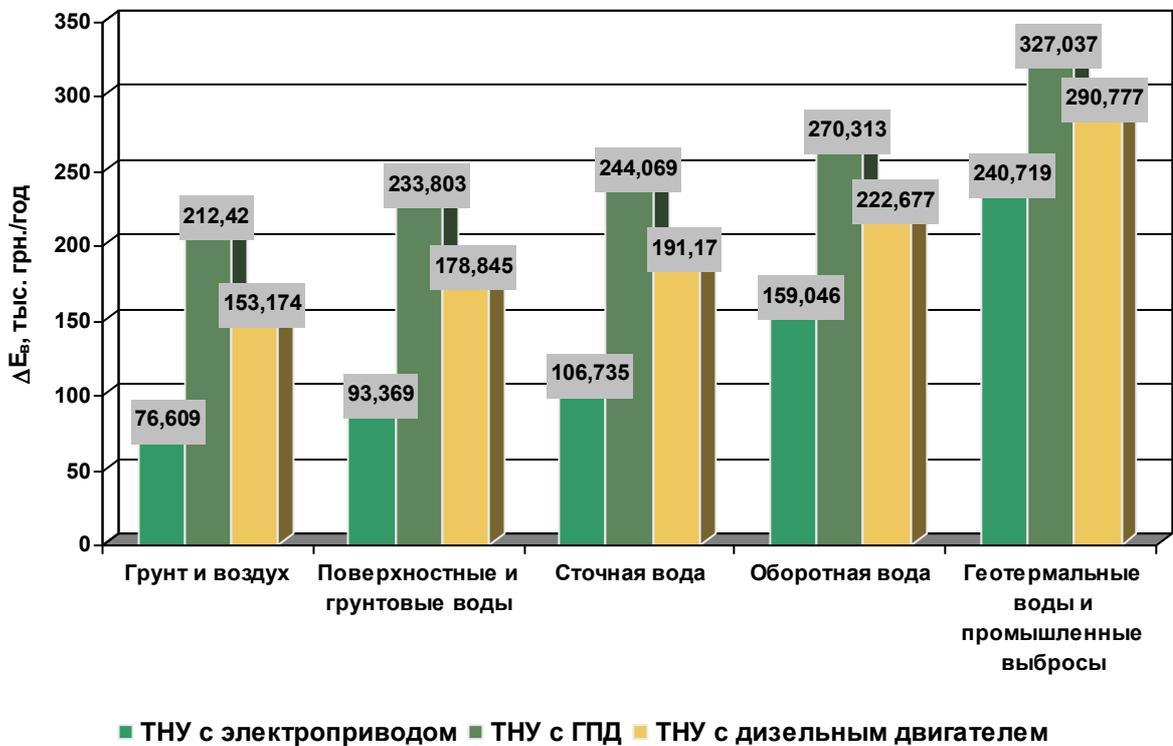


Рис. 7. Значения годовой экономии средств на выбросах CO<sub>2</sub> при использовании ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной

На рис. 8 показано распределение годовой экономии средств на топливе  $\Delta E_T$  и выбросах  $\Delta E_B$  для случаев использования ТНУ с приводом от ГПД на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной. Как видно из рис. 8, наибольшие значения годовой экономии средств на топливе и выбросах соответствуют таким источникам теплоты для ТНУ, как: оборотная вода, геотермальные воды и промышленные тепловые выбросы. Это обусловлено высоким температурным уровнем указанных источников низкотемпературной теплоты, высокой энергетической эффективностью ТНУ и значительной экономией топлива в случае использования этих источников низкотемпературной теплоты.

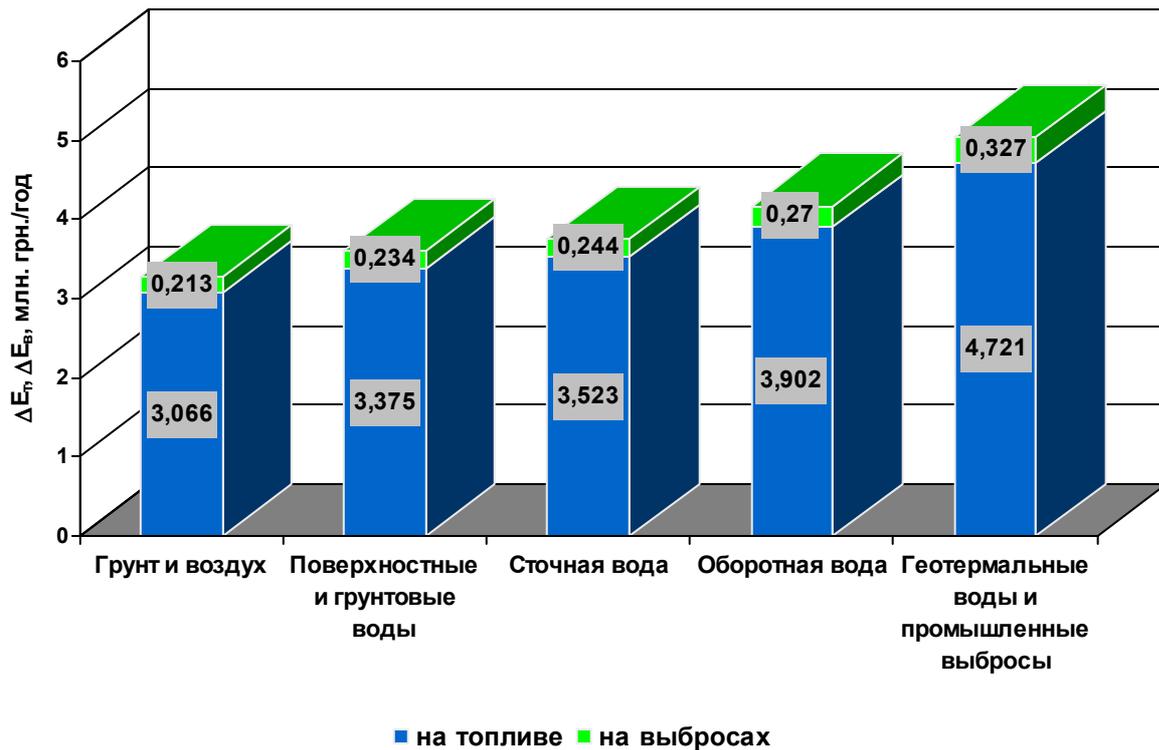


Рис. 8. Распределение годовой экономии средств на топливе и выбросах для случаев использования ТНУ с приводом от ГПД на разных источниках низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной

На рис. 9 показано распределение годовой экономии средств на топливно-энергетических ресурсах  $\Delta E_T$  и выбросах  $\Delta E_B$  от использования ТНУ с электроприводом для разных источников низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной.

Из рис. 8 и 9 видно, что в случае применения ТНУ с электроприводом достигается большая экономия средств (на топливе и общая), чем для ТНУ с приводом от ГПД. Это обусловлено, в первую очередь, значительными объемами экономии дорогостоящего рабочего топлива (природного газа) от применения ТНУ с электроприводом.

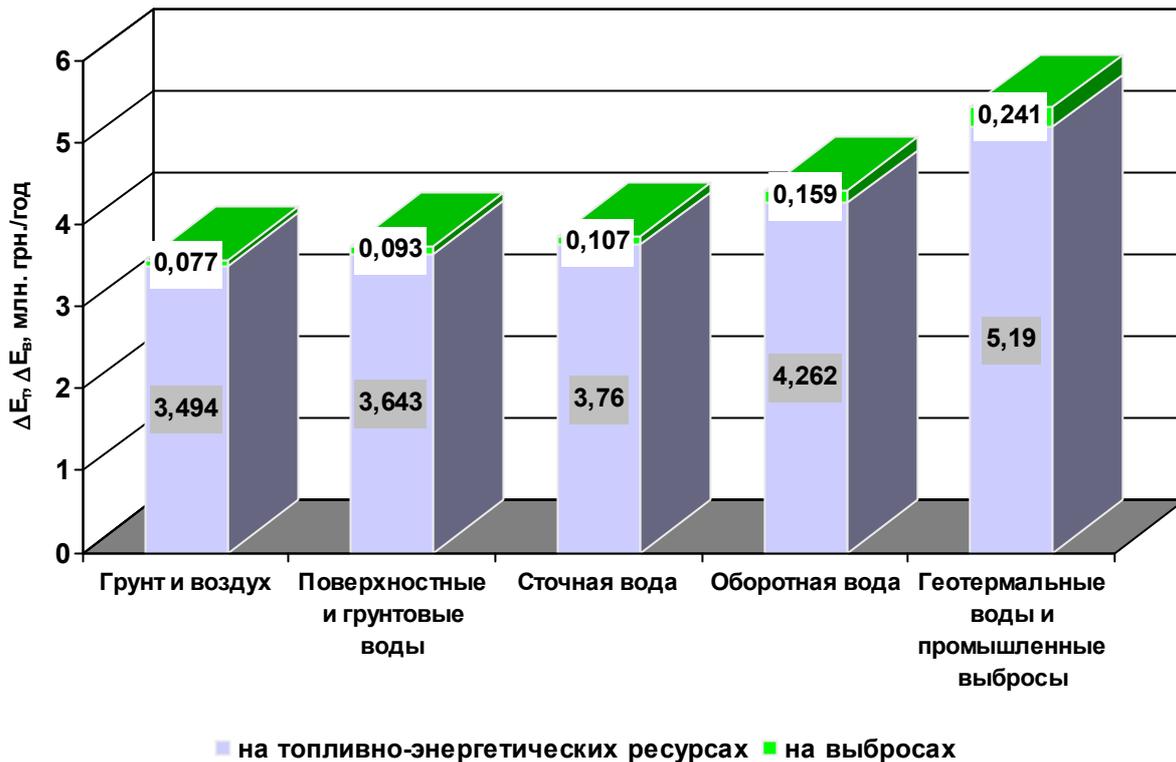


Рис. 9. Распределение годовой экономии средств на топливно-энергетических ресурсах и выбросах от использования ТНУ с электроприводом для разных источников низкотемпературной теплоты по сравнению с работой газовой котельной

### Выводы

Проведена оценка энергетической, экологической и экономической эффективности парокompрессионных ТНУ с разными видами привода в системах теплоснабжения по сравнению с альтернативными источниками теплоснабжения.

Определены значения годовой экономии условного топлива для ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода, с использованием теплоты разных низкотемпературных источников. В зависимости от избранного источника низкотемпературной теплоты экономия условного топлива составляет: для ТНУ с электроприводом – 18,51...54,53%; для ТНУ с приводом от ГПД – 48,11...74,07%; для ТНУ с приводом от дизельного двигателя – 42,63...70,71%.

Оценено снижение выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании ТНУ мощностью 1 МВт по сравнению с работой водогрейной котельной такой же мощности на природном газе. Определено, что:

- для ТНУ с разными видами привода для всех исследованных источников низкотемпературной теплоты обеспечивается снижение количества выбросов  $\text{CO}_2$ ;
- для ТНУ с приводом от ГПД фиксируют более существенное снижение годового количества выбросов  $\text{CO}_2$ , чем для ТНУ с электроприводом;
- в случае использования ТНУ с дизельным двигателем годовое количество выбросов  $\text{CO}_2$  является большим, чем для ТНУ с приводом от ГПД, но меньшим, чем для ТНУ с электроприводом;
- ТНУ оказывают на окружающую среду значительно меньшее негативное влияние, чем котельные.

Оценена экономия средств на топливно-энергетических ресурсах и выбросах для ТНУ мощностью 1 МВт с разными видами привода, с использованием теплоты разных низкотемпературных источников. В случае применения ТНУ с электроприводом достигается большая

экономия средств (на топливе и общая), чем для ТНУ с приводом от ГПД. Это обусловлено, в первую очередь, значительными объемами экономии дорогостоящего рабочего топлива (природного газа) от применения ТНУ с электроприводом.

Наибольшие значения экономии условного топлива, годового снижения количества выбросов CO<sub>2</sub>, годовой экономии средств на топливе и выбросах соответствуют таким источникам теплоты для ТНУ, как: обратная вода, геотермальные воды и промышленные тепловые выбросы. Это обусловлено высоким температурным уровнем указанных источников низкотемпературной теплоты, высокой энергетической эффективностью ТНУ и значительной экономией топлива в случае использования этих источников низкотемпературной теплоты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бертокс Я. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / Я. Бертокс, Д. Радд. – М. : Мир, 1980. – 606 с.
2. Любчик Г. Н. Ресурсные и экологические проблемы глобального и регионального энергопотребления / Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов // Энергетика и электрификация. – 2002. – № 9. – С. 35 – 47.
3. Драганов Б. Х. К вопросу о тепловых насосах / Б. Х. Драганов, А. В. Мищенко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 94 – 98.
4. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
5. Осипов А. Л. Исследование и разработка схем теплоснабжения для использования низкопотенциального тепла на основе применения теплонасосных установок: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Осипов Айрат Линарович. – Казань, 2005. – 117 с.
6. Маринченко А. Ю. Оптимизация исследований комбинированных теплопроизводящих установок с тепловыми насосами: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Маринченко Андрей Юрьевич. – Иркутск, 2004. – 120 с.
7. Оценка экономической целесообразности использования тепловых насосов в коммунальной теплоэнергетике Украины / Беяева Т. Г., Рутенко А. А., Ткаченко М. В. [та ін.] // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 81 – 87.
8. Долинский А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 71 – 83.
9. Анализ экономической эффективности при реализации теплонасосных систем для теплоснабжения / Басок Б. И., Беяева Т. Г., Рутенко А. А. [та ін.] // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 56 – 63.
10. Остапенко О. П. Енергетична та екологічна ефективність теплонасосних установок на підприємствах харчової промисловості / О. П. Остапенко, І. С. Колос // Вісник ВПІ. – 2010. – № 3. – С. 67 – 71.
11. Энергетический, экологический и экономический аспекты эффективности теплонасосных станций на природных и промышленных источниках теплоты [Электронный ресурс] / Остапенко О. П., Бакум Е. В., Ющишина А. В. // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 3. Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3040/4627>.
12. Энергетическая эффективность теплонасосных станций с разными источниками теплоты при переменных режимах работы [Электронный ресурс] / Остапенко О. П., Шевченко О. В., Бакум Е. В. // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 4. Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5067>.
13. Національна комісія регулювання електроенергетики України [Електронний ресурс] // Режим доступу: [www.nerc.gov.ua](http://www.nerc.gov.ua).

**Остапенко Ольга Павловна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики.

**Слободянюк Александр Михайлович** – студент института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.