

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; О. В. Шевченко; Е. В. Бакум

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С РАЗНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

*Определены режимы эффективной работы теплонасосных станций (ТНС) с разными видами привода компрессора и источниками низкотемпературной теплоты при переменных режимах работы систем теплоснабжения. Предложенные рекомендации позволяют осуществить выбор режимов работы ТНС и источников низкотемпературной теплоты с целью достижения заданных значений показателей эффективности круглогодичной работы ТНС. Представленные рекомендации могут быть использованы для прогнозирования рациональных режимов работы ТНС разной мощности в системах теплоснабжения.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, теплонасосная станция, теплонасосная установка, режимы работы систем теплоснабжения.

### Введение

Дефицит топливно-энергетических ресурсов в Украине и экологические преимущества тепловых насосов стимулируют внедрение теплонасосных станций (ТНС) в промышленность и муниципальную энергетику. Сооружение теплонасосных станций на базе водогрейных котельных позволит сократить потребление природного газа и уменьшить стоимость тепловой энергии. Это обуславливает актуальность исследований энергетической эффективности теплонасосных станций.

За последние годы проведен ряд исследований эффективности ТНС в тепловых схемах источников энергоснабжения. В работе [1] авторами выполнены исследования по повышению энергоэффективности источников теплоснабжения путем использования теплонасосных установок (ТНУ) с учетом влияния схемных решений и режимов работы. В исследовании [2] рассмотрена "функция цели" ТНС, представленная экономией топлива в системе энергоснабжения при оценке энергетической эффективности и прироста интегрального эффекта. В [3] рассмотрены комбинированные схемы теплоснабжения с ТНУ при использовании низкотемпературной теплоты от разных источников на промышленных электростанциях. В исследовании [4] проанализирована эффективность ТНС с электроприводом и с приводом от газотурбинной установки и котлом-утилизатором.

Авторами [5] проведены сравнительные исследования трех систем энергоснабжения (на базе газового котла, теплового насоса и когенерационной установки с тепловым насосом). В работе [6] проведена оценка эффективности четырех источников теплоснабжения мощностью 3 МВт на базе электродвигателя, топливного котла (газ, жидкое топливо) и теплонасосной установки. В работе [7] проведена оценка энергоэффективности теплонасосной установки малой мощности по сравнению с традиционными источниками теплоснабжения на базе электрического и газового котла.

В исследованиях [1 – 7] оценку эффективности ТНС проводили по таким критериям: коэффициент преобразования, экономия рабочего и условного топлива по сравнению с существующей схемой по экономическим показателям.

В проанализированных работах [1 – 7] авторами не проведена оценка энергетической эффективности ТНС с разными видами привода для переменных режимов работы систем теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности ТНУ. Отсутствует анализ энергетической эффективности ТНС с разными источниками низкотемпературной теплоты.

**Целью исследования** является оценка энергетической эффективности ТНС с разными видами привода компрессора на разных источниках низкотемпературной теплоты с учетом переменных режимов работы систем теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности ТНУ; проведение оптимизационных исследований с целью определения рациональных режимов работы ТНС разной мощности в системах теплоснабжения.

### Основная часть

Исследование проводили методом математического моделирования работы ТНС с использованием программы в среде Excel. Программу используют для моделирования работы теплонасосных станций с разными видами привода компрессора для теплоснабжения. Программа имеет блочную структуру и состоит из таких расчетных модулей: расчет тепловой схемы замещающей водогрейной котельной, расчет теплонасосной установки, расчет двигателя внутреннего сгорания и системы утилизации теплоты, расчет энергетической эффективности теплонасосной станции. Предусмотрен модуль выбора источника низкотемпературной теплоты для ТНС и его температурного уровня в зависимости от режима работы ТНС.

Исследовали энергетическую эффективность ТНС с электроприводом и приводом компрессора от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) максимальной мощностью 10 МВт в отопительный сезон, максимальная мощность ТНС в режиме работы для горячего водоснабжения составляла 2 МВт. Как сравнительный вариант принимался вариант работы водогрейной котельной такой же мощности. Исследование проводилось для разных источников низкотемпературной теплоты с учетом переменных режимов работы ТНС для систем теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности теплового насоса. Мощность конденсатора теплового насоса изменялась от 500 до 2000 кВт в соответствии с марками теплонасосного оборудования, выпускаемого промышленностью [8]. Источниками низкотемпературной теплоты для ТНС были: поверхностные воды, вода системы оборотного водоснабжения, грунтовые воды, геотермальные воды, воздух, вторичные энергоресурсы (ВЭР), канализационные сточные воды и теплота грунта.

Эффективность работы ТНС в значительной степени определяют оптимальным распределением нагрузки между теплонасосной установкой и водогрейным котлом в составе ТНС. Распределение нагрузки между элементами ТНС характеризуется долей нагрузки ТНУ в составе ТНС  $\beta$ , которая определяется как отношение мощности конденсатора ТНУ к мощности ТНС

$$\beta = \frac{Q_{ТНУ}}{Q_{ТНС}}. \quad (1)$$

Мощность и температурные режимы работы теплонасосной станции в системе теплоснабжения определяют по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха и необходимой мощности потребителей.

На основе анализа результатов проведенных исследований определены оптимальные значения показателя  $\beta$  для ТНС на разных источниках теплоты с разными видами привода компрессора ТНУ при переменных режимах работы тепловой сети. Каждому из этих режимов соответствует определенное значение тепловых мощностей ТНС, ТНУ и доли нагрузки ТНУ  $\beta$ .

Для случаев переменных режимов работы и переменной тепловой нагрузки ТНС на протяжении года среднегодовое значение доли нагрузки ТНУ в составе ТНС может быть определено таким образом:

$$\beta_{\text{ср.год.}} = \frac{\sum_i \beta_i \cdot \tau_i}{\tau_{\text{год.}}}, \quad (2)$$

где  $\beta_i$  – доля нагрузки ТНУ для  $i$ -го режима работы ТНС;  $\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го режима работы ТНС;  $\tau_{\text{год.}}$  – годовая продолжительность работы ТНС.

Экономия условного топлива от внедрения ТНС в значительной степени определяют оптимально подобранными режимами работы ТНС, рациональным распределением нагрузки между водогрейным котлом и ТНУ, следовательно, оптимальным значением доли нагрузки ТНУ в составе ТНС  $\beta$ . На основе определенных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  оценивают экономию условного топлива ТНС для определенного режима работы системы теплоснабжения.

Для случаев переменных режимов работы и переменной тепловой нагрузки ТНС на протяжении года среднегодовое значение экономии условного топлива ТНС может быть определено таким образом:

$$\Delta B_{\text{ср.год.}} = \frac{\sum_i \Delta B_i \cdot \tau_i}{\tau_{\text{год.}}}, \quad (3)$$

где  $\Delta B_i$  – экономия условного топлива от внедрения ТНС для  $i$ -го режима работы ТНС, %;  $\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го режима работы ТНС;  $\tau_{\text{год.}}$  – годовая продолжительность работы ТНС.

Предложенные критерии позволяют оценить энергетическую эффективность работы ТНС на протяжении года при разных режимах работы.

Результаты исследований эффективности работы ТНС на разных источниках теплоты с разными видами привода при переменных режимах работы ТНС приведены в таблицах, представленных ниже. Здесь приведены мощности ТНУ, указаны значения доли нагрузки ТНУ. Значения экономии условного топлива ТНС с электроприводом и приводом от ДВС указаны для отопительного и межотопительного режимов, а также среднегодовые значения этих показателей в зависимости от доли нагрузки ТНУ.

В таблице 1 приведены значения показателей энергетической эффективности работы ТНС на теплоте поверхностных вод и оборотной воды с электроприводом или приводом компрессора от ДВС при переменных режимах работы ТНС. Как видно из таблицы 1, наибольшие значения экономии условного топлива ТНС соответствуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Для ТНС с электроприводом на теплоте поверхностных вод экономия условного топлива обеспечивается не для всех режимов работы ТНС, существенная экономия условного топлива обеспечивается для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta > 0,502$ . Максимальное значение годовой экономии условного топлива ТНС с электроприводом на теплоте поверхностных вод составляет 10,12% и соответствует среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ . Для ТНС с приводом от ДВС на теплоте поверхностных вод максимальное значение годовой экономии условного топлива составляет 37,87% и соответствует среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ .

В таблице 1 также приведены значения показателей энергетической эффективности работы ТНС на теплоте оборотной воды с электроприводом и приводом компрессора от ДВС при переменных режимах работы ТНС. Для таких ТНС с электроприводом экономия условного топлива обеспечивается для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta > 0,187$ . Как и в предыдущем случае, наибольшие значения экономии условного топлива ТНС соответствуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС на теплоте оборотной воды

составляют: для электропривода – 26%, для привода от ДВС – 45,52% и соответствуют среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta=0,629$ .

Таблица 1

**Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте поверхностных вод и оборотной воды**

Мощность ТНУ, кВт		Экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %		Экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %		Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %	Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %	Доля тепловой нагрузки, которую покрывает ТНУ $\beta$		
Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период			Отопительный период	Межотопительный период	Среднее значение за год
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте поверхностных вод										
500	500	-22,92	4,73	1,84	11,32	-8,69	6,66	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-14,98	4,73	5,94	11,32	-4,84	8,64	0,121	0,25	0,187
1500	500	-7,04	4,73	10,57	11,32	-0,99	10,88	0,182	0,25	0,2165
2000	500	0,901	4,73	15,81	11,32	2,86	13,41	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-14,98	9,46	5,94	24,35	-2,42	15,3	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-7,04	9,46	10,57	24,35	1,43	17,53	0,182	0,5	0,344
2000	1000	0,901	9,46	15,81	24,35	5,27	20,06	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-7,04	14,19	10,57	39,88	3,95	25,45	0,182	0,75	0,472
2000	1500	0,901	14,19	15,81	39,88	7,7	27,98	0,243	0,75	0,502
2000	2000	0,901	18,92	15,81	59,26	10,12	37,87	0,243	1	0,629
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте оборотной воды										
500	500	-14,61	10,51	3,06	15,15	-1,7	9,21	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-6,67	10,51	8,25	15,15	2,15	11,72	0,121	0,25	0,187
1500	500	1,27	10,51	13,06	15,15	6,00	14,40	0,182	0,25	0,2165
2000	500	9,21	10,51	19,79	15,15	9,85	17,29	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-6,67	21,03	8,25	31,52	7,53	20,07	0,121	0,5	0,315
1500	1000	1,27	21,03	13,06	31,52	11,38	22,85	0,182	0,5	0,344
2000	1000	9,21	21,03	19,79	31,52	15,23	25,64	0,243	0,5	0,374
1500	1500	1,27	31,54	13,06	49,65	16,76	31,99	0,182	0,75	0,472
2000	1500	9,21	31,54	19,79	49,65	20,61	34,88	0,243	0,75	0,502
2000	2000	9,21	42,05	19,79	70,48	26,00	45,52	0,243	1	0,629

Значения показателей энергетической эффективности работы ТНС на теплоте грунтовых и геотермальных вод с разными видами привода, при переменных режимах работы ТНС, показаны в таблице 2.

Как видно из табл. 2, наибольшие значения экономии условного топлива ТНС соответ-

вуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Для ТНС с электроприводом экономия условного топлива обеспечивается для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta > 0,502$ . Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС на теплоте грунтовых вод составляют: для электропривода – 5,64%, для привода от ДВС – 35,07% и соответствуют – среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Таблица 2

**Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте грунтовых и геотермальных вод**

Мощность ТНУ, кВт		Экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %		Экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %		Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %	Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %	Доля тепловой нагрузки, которую покрывает ТНУ $\beta$		
Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период			Отопительный период	Межотопительный период	Среднее значение за год
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте грунтовых вод										
500	500	-22,92	2,54	1,84	9,86	-9,8	5,92	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-14,98	2,54	5,94	9,86	-5,95	7,91	0,121	0,25	0,187
1500	500	-7,04	2,54	10,57	9,86	-2,11	10,14	0,182	0,25	0,2165
2000	500	0,901	2,54	15,81	9,86	1,74	12,67	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-14,98	5,09	5,94	21,64	-4,67	13,91	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-7,04	5,09	10,57	21,64	-0,8	16,14	0,182	0,5	0,344
2000	1000	0,901	5,09	15,81	21,64	3,04	18,67	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-7,04	7,63	10,57	36,18	0,49	23,57	0,182	0,75	0,472
2000	1500	0,901	7,63	15,81	36,18	4,34	26,09	0,243	0,75	0,502
2000	2000	0,901	10,17	15,81	55,02	5,64	35,07	0,243	1	0,629
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте геотермальных вод										
500	500	0,44	16,13	5,28	29,13	6,98	17,205	0,0609	0,25	0,158
1000	500	8,38	16,13	12,46	29,13	12,31	20,795	0,121	0,25	0,187
1500	500	16,32	16,13	19,73	29,13	16,17	24,43	0,182	0,25	0,2165
2000	500	24,26	16,13	27,13	29,13	20,02	28,13	0,243	0,25	0,246
1000	1000	8,38	32,26	12,46	38,49	20,57	25,475	0,121	0,5	0,315
1500	1000	16,32	32,26	19,73	38,49	24,42	29,11	0,182	0,5	0,344
2000	1000	24,26	32,26	27,13	38,49	28,27	32,81	0,243	0,5	0,374
1500	1500	16,32	48,39	19,73	59,12	32,68	39,425	0,182	0,75	0,472
2000	1500	24,26	48,39	27,13	59,12	36,53	43,125	0,243	0,75	0,502
2000	2000	24,26	64,52	27,13	81,38	44,49	54,255	0,243	1	0,629

В таблице 2 также показаны значения показателей эффективности работы ТНС на теплоте геотермальных вод с разными видами привода, при переменных режимах работы ТНС, в зависимости от доли нагрузки ТНУ. Экономия условного топлива обеспечивается для всех режимов работы ТНС. Максимальные значения экономии условного топлива таких ТНС соответствуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС на теплоте геотермальных вод составляют: для электропривода – 44,49%, для привода от ДВС – 54,255% – и соответствуют среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta=0,629$ .

Таблица 3

## Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте воздуха и ВЭР

Мощность ТНУ, кВт		Экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %		Экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %		Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %	Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %	Доля тепловой нагрузки, которую покрывает ТНУ $\beta$		
Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период			Отопительный период	Межотопительный период	Среднее значение за год
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте воздуха										
500	500	-26,47	2,54	1,32	9,87	-11,53	5,67	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-18,53	2,54	4,97	9,87	-7,68	7,43	0,121	0,25	0,187
1500	500	-10,59	2,54	9,2	9,87	-3,83	9,47	0,182	0,25	0,2165
2000	500	-2,65	2,54	14,12	9,87	0,016	11,86	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-18,53	5,08	4,97	21,64	-6,38	13,43	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-10,59	5,08	9,2	21,64	-2,53	15,48	0,182	0,5	0,344
2000	1000	-2,65	5,08	14,12	21,64	1,31	17,86	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-10,59	7,63	9,2	38,8	-1,23	22,9	0,182	0,75	0,472
2000	1500	-2,65	7,63	14,12	38,8	2,62	25,28	0,243	0,75	0,502
2000	2000	-2,65	10,17	14,12	55,02	3,92	34,89	0,243	1	0,629
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте ВЭР										
500	500	2,57	22,07	5,53	22,83	12,39	14,32	0,0609	0,25	0,158
1000	500	10,2	22,07	12,97	22,83	16,52	17,91	0,121	0,25	0,187
1500	500	18,14	22,07	20,46	22,83	20,09	21,53	0,182	0,25	0,2165
2000	500	26,08	22,07	28,03	22,83	23,93	25,18	0,243	0,25	0,246
1000	1000	10,2	44,14	12,97	45,85	27,54	29,66	0,121	0,5	0,315
1500	1000	18,14	44,14	20,46	45,85	31,4	33,27	0,182	0,5	0,344
2000	1000	26,08	44,14	28,03	45,85	35,24	36,93	0,243	0,5	0,374
1500	1500	18,14	66,22	20,46	69,16	42,69	45,16	0,182	0,75	0,472

2000	1500	26,08	66,22	28,03	69,16	46,54	48,82	0,243	0,75	0,502
2000	2000	26,08	88,29	28,03	92,91	57,84	60,93	0,243	1	0,629

Значения показателей эффективности работы ТНС на теплоте воздуха с разными видами привода, при переменных режимах работы ТНС, показаны в таблице 3. Для ТНС с электроприводом фиксируют перерасход условного топлива для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta < 0,502$ . Это свидетельствует о том, что работа ТНС с таким источником теплоты и видом привода является эффективной не для всех режимов работы. Для ТНС с приводом от ДВС фиксируют экономию условного топлива для всех режимов работы, а наибольшее значение годовой экономии топлива ТНС составляет 31,16% и соответствует среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ .

В таблице 3 также приведены значения показателей эффективности работы ТНС на теплоте вторичных энергоресурсов с разными видами привода в зависимости от доли нагрузки ТНУ. Для ТНС с электроприводом существенная экономия условного топлива обеспечивается для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta > 0,374$ . Наибольшие значения экономии условного топлива таких ТНС соответствуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Максимальные значения годовой экономии топлива ТНС на теплоте вторичных энергоресурсов составляют: для электропривода – 57,84%, для привода от ДВС – 60,93% – и соответствуют среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Значения показателей эффективности работы ТНС на теплоте сточных вод с разными видами привода, при переменных режимах работы ТНС, показаны в таблице 4. Для таких ТНС с электроприводом существенная экономия условного топлива обеспечивается для режимов работы ТНС со среднегодовым значением доли нагрузки ТНУ  $\beta > 0,374$ . Как и в предыдущих случаях, наибольшие значения экономии условного топлива ТНС соответствуют максимальным значениям доли нагрузки ТНУ. Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС на теплоте сточных вод составляют: для электропривода – 10,41%, для привода от ДВС – 38% – и соответствуют среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Таблица 4

## Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте сточных вод и грунта

Мощность ТНУ, кВт		Экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %		Экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %		Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с электроприводом, %	Среднегодовая экономия условного топлива ТНС с приводом от ДВС, %	Доля тепловой нагрузки, которую покрывает ТНУ $\beta$		
Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период	Отопительный период	Межотопительный период			Отопительный период	Межотопительный период	Среднее значение за год
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте сточных вод										
500	500	-22,32	4,73	1,93	11,32	-8,39	6,71	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-14,37	4,73	6,11	11,32	-4,55	8,73	0,121	0,25	0,187
1500	500	-6,43	4,73	10,80	11,32	-0,69	10,99	0,182	0,25	0,2165
2000	500	1,51	4,73	16,10	11,32	3,15	13,55	0,243	0,25	0,246

1000	1000	-14,37	9,46	6,11	24,35	-2,12	15,38	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-6,43	9,46	10,80	24,35	1,72	17,64	0,182	0,5	0,344
2000	1000	1,51	9,46	16,10	24,35	5,57	20,2	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-6,43	14,19	10,80	39,88	4,19	25,56	0,182	0,75	0,472
2000	1500	1,51	14,19	16,10	39,88	8,00	28,12	0,243	0,75	0,502
2000	2000	1,51	18,91	16,10	59,26	10,41	38,00	0,243	1	0,629
Показатели энергетической эффективности работы ТНС на теплоте грунта										
500	500	-31,36	0,39	0,61	8,44	-14,99	4,06	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-23,42	0,39	3,62	8,44	-11,15	6,06	0,121	0,25	0,187
1500	500	-15,48	0,39	7,32	8,44	-7,29	7,84	0,182	0,25	0,2165
2000	500	-7,53	0,39	11,82	8,44	-3,44	10,02	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-23,42	0,79	3,62	18,97	-10,94	11,43	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-15,48	0,79	7,32	18,97	-7,09	13,22	0,182	0,5	0,344
2000	1000	-7,53	0,79	11,82	18,97	-3,24	15,39	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-15,48	1,19	7,32	32,56	-6,89	20,14	0,182	0,75	0,472
2000	1500	-7,53	1,19	11,82	32,56	-3,06	22,32	0,243	0,75	0,502
2000	2000	-7,53	1,59	11,82	50,85	-2,84	31,16	0,243	1	0,629

В таблице 4 также приведены значения показателей эффективности работы ТНС на теплоте грунта с разными видами привода в зависимости от доли нагрузки ТНУ. Для таких ТНС с электроприводом фиксируется перерасход условного топлива для большинства режимов работы ТНС. Работа ТНС с таким источником теплоты и видом привода является неэффективной. Для ТНС на теплоте грунта с приводом от ДВС фиксируется экономия условного топлива для всех режимов работы, а наибольшее значение годовой экономии условного топлива ТНС составляет 31,16% и соответствует среднегодовому значению доли нагрузки ТНУ  $\beta=0,629$ .

Определены и обоснованы рациональные режимы работы ТНС разной мощности в системах теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности ТНУ с учетом комплексного влияния источников низкотемпературной теплоты и вида привода компрессора ТНУ.

Представленные результаты исследований позволяют оценить энергетическую эффективность ТНС с разными видами привода компрессора и источниками низкотемпературной теплоты при переменных режимах работы систем теплоснабжения. Предложенные рекомендации позволяют осуществить выбор режимов работы ТНС и источников низкотемпературной теплоты с целью достижения заданных значений показателей эффективности работы ТНС.

Представленные рекомендации могут быть использованы для прогнозирования рациональных режимов работы ТНС разной мощности в системах теплоснабжения.

### Выводы

1. Существенная экономия условного топлива от внедрения ТНС с электроприводом обеспечивается для режимов работы со значениями доли нагрузки теплового насоса в составе ТНС  $\beta > 0,502$ . Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС с электроприводом фиксируются для таких источников низкотемпературной теплоты, как: вторичные энергоресурсы – 57,84%, геотермальные воды – 44,49%, оборотная вода – 26%, сточные воды – 10,41%. Режимы работы ТНС с электроприводом со среднегодовым значе-

нием доли нагрузки ТНУ  $\beta < 0,502$  на теплоте воздуха являются неэффективными из-за перерасхода условного топлива. Работа ТНС с электроприводом на теплоте грунта является неэффективной, поскольку для большинства режимов работы зафиксирован перерасход условного топлива.

2. В случае внедрения ТНС с приводом от ДВС экономия условного топлива фиксируется для всех исследуемых источников низкотемпературной теплоты и режимов работы. Наибольшие значения годовой экономии топлива таких ТНС соответствуют среднегодовому значению доли нагрузки теплового насоса  $\beta = 0,629$ . Максимальные значения годовой экономии условного топлива ТНС с приводом от ДВС фиксируются для таких источников низкотемпературной теплоты, как: вторичные энергоресурсы – 60,93%, геотермальные воды – 54,26%, оборотная вода – 45,25%, сточные воды – 38%. Минимальное значение годовой экономии условного топлива ТНС с приводом от ДВС обеспечивается при использовании теплоты грунтовых вод – 5,64%.

3. Определены и обоснованы режимы эффективной работы ТНС с разными видами привода компрессора и источниками низкотемпературной теплоты при переменных режимах работы систем теплоснабжения. Предложенные рекомендации позволяют осуществить выбор режимов работы ТНС и источников низкотемпературной теплоты с целью достижения заданных значений показателей эффективности круглогодичной работы ТНС. Представленные рекомендации могут быть использованы для прогнозирования рациональных режимов работы ТНС разной мощности в системах теплоснабжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Новиков Д. В. Выбор рациональных схем и параметров систем теплоснабжения с теплонасосными установками: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Новиков Дмитрий Викторович. – Саратов, 2007. – 128 с.
3. 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.
4. 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.
5. Беляева Т. Г. Оценка экономической целесообразности использования тепловых насосов в коммунальной теплоэнергетике Украины / Т. Г. Беляева, А. А. Рутенко, М. В. Ткаченко, О. Б. Басок // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 81 – 87.
6. Долинский А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 71 – 83.
7. Басок Б. И. Анализ экономической эффективности при реализации теплонасосных систем для теплоснабжения / Б. И. Басок, Т. Г. Беляева, А. А. Рутенко, А. А. Лунина // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 56 – 63.
8. Долинский А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 99 – 105.

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

Винницкий национальный технический университет.

**Шевченко Ольга Валентиновна** – менеджер по административной деятельности.

ООО "НПО Теплоэнергоресурс".

**Бакум Елена Викторовна** – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.