

N.D and Atamanyuk M.P. On the efficiency of centrifugal phase separation method in pectin production // 13 th Intern. Congr. CHISA-98. Praha. – 1998. – prepr. 0803.

12. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1989. – 463 с.

13. *Борбат А.М., Горбань И.С. и др.* Оптические измерения. – Киев: Техніка, – 1967. – 419 с.

14. *Джапаридзе Л.И.* Практикум по микроскопической химии растений. – М. изд. «Советская наука», 1953. – 168 с.

15. *Серенсон И, Кемпбел Т.* Препаративные методы химии полимеров. – М: Химия, пер. с англ., 1963. – 264 с.

16. *Качалай Д.П., Любенко А.А., Вайнберг Р.Ш.* и др. Методические указания по использованию в лечебно-профилактических целях пектина и пектиносодержащих продуктов № 5049-89. – Киев, Урожай, 1990. – 15 с.

Получено 15.12.2009 г.

УДК 629.7.536.27+662.987

Исламова С.И., Шамсутдинов Э.В.

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СТАДИИ ГАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

Представлено розроблений узагальнений алгоритм розв'язання задачі по підвищенню ефективності використання енергії на промисловому підприємстві нафтохімічного комплексу. В рамках даного алгоритму проведена оцінка енергетичної ефективності теплотехнологічної схеми стадії газорозділення виробництва етилену, розроблена система утилізації низькопотенційних ВЕР, вибрано та обґрунтовано спосіб інтенсифікації теплообміну для теплообмінних апаратів схеми.

Представлен разработанный обобщенный алгоритм решения задачи по повышению эффективности энергоиспользования на промышленном предприятии нефтехимического комплекса. В рамках данного алгоритма проведена оценка эффективности энергоиспользования теплотехнологической схемы стадии газоразделения производства этилена, разработана система утилизации низькопотенціальних ВЕР, выбран и обоснован способ интенсификации теплообмена для теплообменных аппаратов схемы.

In work developed generalized problem algorithm to increase of effectiveness of energy usage of petrochemical plant is presented. In the limit of this algorithm the effectiveness of energy usage of thermo-technological gas separation scheme in manufacture ethylene is estimated, system the low-potential secondary energy resources utilization is developed, a way of intensification heat exchange for heat exchangers is selected and substantiated.

b – ширина треугольного интенсификатора;

d – внутренний диаметр трубы;

h – высота интенсификатора;

Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

s – шаг накатки;

α – коэффициент теплоотдачи;

η – теплогидродинамическая эффективность;

ξ – гидравлическое сопротивление;

АСУТП – автоматизированная система

управления технологическими процессами;

ВЭР – вторичные энергоресурсы;

ГВС – горячее водоснабжение;

ПЭУ – пароэжекционная установка;
СКУ – система комплексной утилизации;
ТОА – теплообменный аппарат.

Введение

На сегодняшний день большинство предприятий не обладают значительным объемом оборотных средств, необходимых для своевременной модернизации производства и приобретения принципиально нового вида оборудования. В таких условиях наиболее вероятными тенденциями поступательного развития предприятий различных отраслей промышленности, в особенности нефтехимического комплекса, с точки зрения их практической реализации, являются обеспечение принципа экономии энергетических ресурсов, опережающее увеличение объемов выработки продукции по сравнению с ростом производственных затрат.

Для нефтехимических производств характерны большие, занимаемые оборудованием территории, разнообразие номенклатуры технологического оборудования и арматуры. Режимные параметры каждого оборудования определяются требованиями технологического регламента и влияют на энергоиспользование и выход вторичных энергоресурсов в производственном процессе. Нефтехимические предприятия также оказывают значительное влияние на экологическое состояние регионов, в котором они расположены [1,2].

Особый интерес при оценке эффективности энергоиспользования на нефтехимических предприятиях представляют решения, направленные на эффективное вовлечение вторичных энергоресурсов в систему энергообеспечения и проектирование нового высокоэффективного теплотехнологического оборудования или модификацию уже существующего. При этом возникают вопросы поиска оптимального варианта технологии утилизации ВЭР и методов повышения эффективности отдельных аппаратов и устройств.

Наиболее эффективные решения при реа-

Индексы:

0 – гладкий канал;
инт – интенсификатор теплообмена.

лизации данных мероприятий могут быть получены только при системном анализе, рассматривающим единую технологически связанную систему энергоснабжения и энергоиспользования, причем наибольшие резервы имеются в области энергопотребления.

Алгоритм решения задачи по повышению эффективности энергоиспользования на нефтехимическом предприятии и выбор объекта исследования

С целью использования комплексного подхода при решении задачи разработки системных энергосберегающих мероприятий разработан обобщенный алгоритм (рис. 1). Конечной целью исследований в рамках данного алгоритма является разработка мероприятий по повышению эффективности энергоиспользования схемы, включающие схемные решения по утилизации ВЭР и решения по повышению энергоэффективности единичных аппаратов схемы [3]. Алгоритм методики условно разделен на семь взаимосвязанных блоков.

Блок I. Осуществляется выбор объекта исследования – конкретное нефтехимическое производство (или его отдельная стадия), характеризующееся сложной многоуровневой структурой, на функционирование которой необходимы значительные затраты энергии и ресурсов.

Блок II. Сбор данных по исследуемому производству осуществляется на основе технологических регламентов, режимных карт АСУТП. В результате обработки полученной информации формируется целевая функция исследования – основная цель решения поставленной задачи с определенными ограничениями.

Блок III. Выбор метода исследования осуществляется в зависимости от следующих

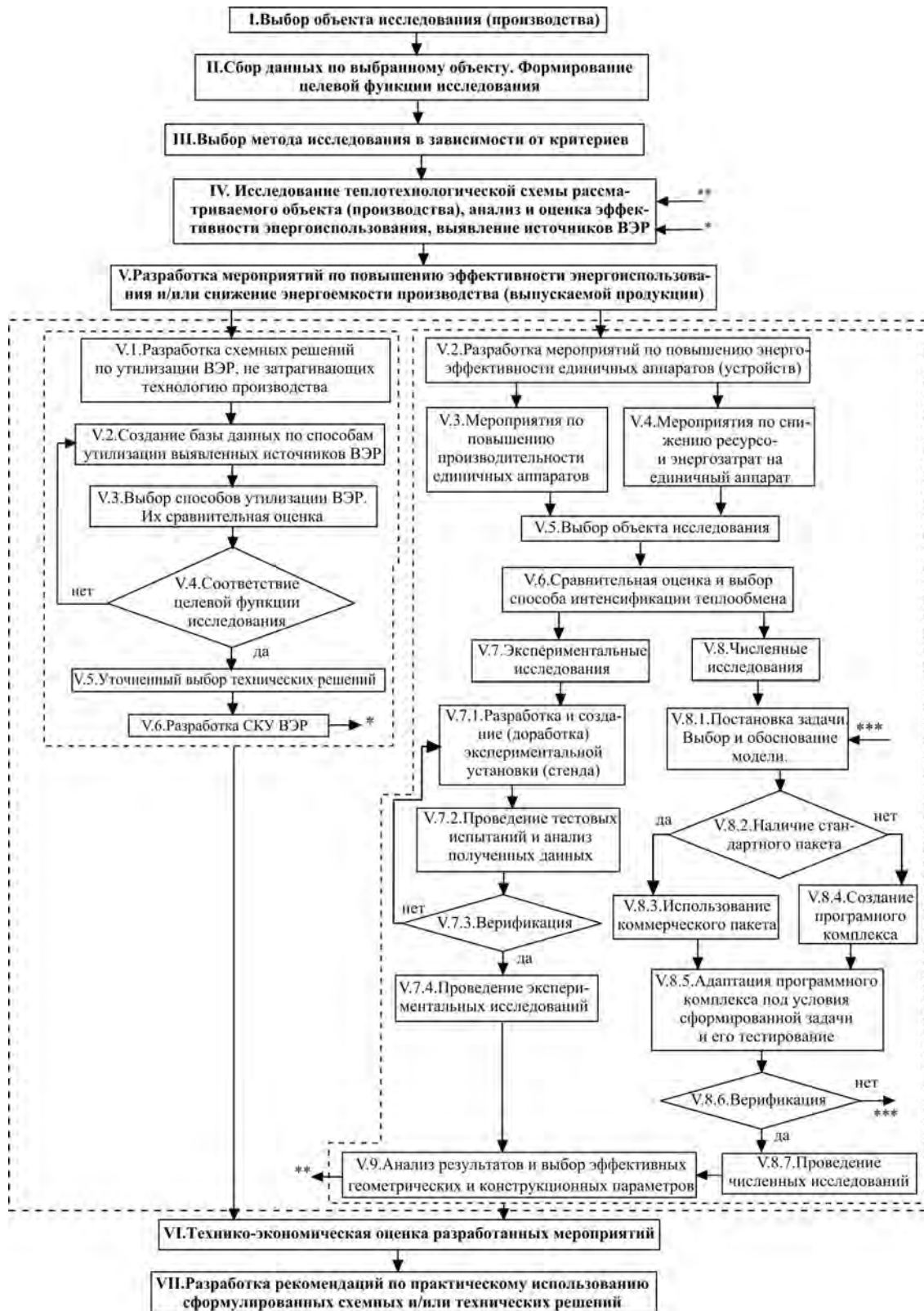


Рис. 1. Обобщенный алгоритм решения задачи по повышению эффективности энергоиспользования на нефтехимическом предприятии.

критериев: уровень и сложность иерархической структуры производства; структура энергопотребления; виды и объемы используемых топливно-энергетических ресурсов; номенклатура эксплуатируемого технологического, теплотехнического и теплоэнергетического оборудования; целевая функция исследования.

Блок IV. Исследование теплотехнологической схемы, анализ и оценка эффективности энергоиспользования основан на использовании методологии системного анализа, включающего в себя анализ структуры связей, тепловой и термодинамический анализ [4,5]. Так как элементы теплотехнологической схемы нефтехимического производства связаны между собой прямыми и обратными энергетическими, технологическими потоками с различными параметрами, требуется условное упрощение сложной замкнутой структуры схемы. Для этого используется топологический метод анализа, позволяющий на основе математического моделирования выявить структурные особенности и найти последовательность расчета элементов теплотехнологической схемы.

В ходе исследований выбирается критерий оценки эффективности производства на основе расходных характеристик, материального баланса потребляемых сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, термодинамических показателей технологических и энергетических процессов. Далее проводится оценка эффективности энергоиспользования на основе теплового и термодинамического анализов. Источником информации служит математическая модель теплотехнологической схемы в виде системы балансовых уравнений для каждого элемента схемы. В процессе анализа выявляются потери энергии от необратимости для отдельных элементов и всей системы в целом; определяются потоки ВЭР.

Блок V. Данный блок включает разработку схемных решений по утилизации ВЭР и мероприятий по повышению энергоэффективности

единичных аппаратов теплотехнологической схемы. Разработка схемных решений включает анализ возможных способов утилизации выявленных потоков ВЭР и составление базы данных по возможным техническим решениям. Выбор конкретного решения осуществляется в результате сопоставления всех возможных вариантов для выявленных потоков ВЭР. Далее производится разработка СКУ ВЭР, базирующаяся на обоснованном способе утилизации, отвечающем целевой функции исследования. При разработке мероприятий по повышению энергоэффективности единичных аппаратов теплотехнологической схемы возможны технические решения по повышению производительности единичных аппаратов и/или по снижению ресурсо- и энергозатрат на единичный аппарат за счет интенсификации теплообмена. Основная цель экспериментального и/или численного исследования интенсификации теплообмена – это поиск и оценка эффектов интенсификации, нахождение наиболее рационального способа и выбор эффективных геометрических и конструктивных параметров интенсификаторов в зависимости от гидродинамических режимов и тепловых нагрузок, теплофизических и реологических свойств теплоносителей.

Блок VI. При технико-экономическом анализе интенсифицированных теплообменников проводится поверочный расчет и осуществляется оценка их эффективности. Технико-экономическая оценка разработанной СКУ ВЭР включает подбор и расчет утилизационного оборудования, определение капитальных затрат и годовых эксплуатационных расходов, а также срока окупаемости предлагаемых решений.

Блок VII. На заключительном этапе исследований определяются направления использования предлагаемых решений и разрабатываются рекомендации по их практическому применению.

В качестве объекта исследования выбра-

на стадия газоразделения крупнотоннажного производства этилена, реализованная на заводе «Этилен» ОАО «Казаньоргсинтез», являющимся крупнейшим предприятием нефтехимической отрасли, на котором производится порядка 400 тыс. т этилена в год. Стадия газоразделения, являющаяся составной частью производства этилена, характеризуется значительными потерями энергии ВЭР низкого потенциала. Теплотехнологическая схема исследуемой стадии газоразделения имеет сложную структуру, объединяющую 96 технологических аппаратов, отличающихся различной конструкцией, назначением, структурой включения в технологическую линию и термодинамическими параметрами. На данной стадии до 50 % от основного технологического оборудования составляют теплообменные аппараты.

Целевой функцией исследований является повышение эффективности энергоиспользова-

ния с учетом минимизации влияния предлагаемых решений на технологические процессы.

В рамках разработанного алгоритма проведено исследование теплотехнологической схемы газоразделения производства этилена. В результате оценки эффективности энергоиспользования определены технологические участки с наименьшей термодинамической эффективностью – участок гидрирования этанэтиленовой фракции, участок концентрирования пропилена и этиленовый холодильный цикл, что обуславливает необходимость разработки мероприятий по повышению эффективности энергоиспользования для данных расчетных блоков.

Также выявлены источники низкопотенциальных ВЭР – паровой конденсат после кипятильников и оборотная вода после холодильников и конденсаторов (табл. 1). Общий потенциал ВЭР по теплоте составляет 60,5 МВт, по эксергии – 8,2 МВт.

Табл. 1. Потоки низкопотенциальных ВЭР

| Теплоноситель | G , кг/с | T , °С | P , МПа | Q , МВт | E , МВт |
|-------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Паровой конденсат | 2,67 | 138 | 0,34 | 4,61 | 0,70 |
| Паровой конденсат | 0,90 | 138 | 0,34 | 1,55 | 0,24 |
| Паровой конденсат | 4,10 | 138 | 0,34 | 7,08 | 1,07 |
| Паровой конденсат | 0,13 | 145 | 0,34 | 0,23 | 0,04 |
| Оборотная вода | 2,85 | 30 | 0,59 | 3,60 | 0,66 |
| Оборотная вода | 0,73 | 30 | 0,29 | 0,93 | 0,12 |
| Оборотная вода | 0,08 | 30 | 0,59 | 0,1 | 0,01 |
| Оборотная вода | 0,01 | 36 | 0,59 | 0,01 | 0,002 |
| Оборотная вода | 0,05 | 30 | 0,59 | 0,06 | 0,008 |
| Оборотная вода | 0,10 | 35 | 0,59 | 0,13 | 0,02 |
| Оборотная вода | 0,03 | 30 | 0,34 | 0,04 | 0,005 |
| Оборотная вода | 3,10 | 15 | 0,59 | 3,75 | 0,71 |
| Оборотная вода | 23,7 | 45 | 0,59 | 31,67 | 3,99 |
| Оборотная вода | 4,50 | 30 | 0,26 | 5,82 | 0,74 |
| Оборотная вода | 3,67 | 25 | 0,59 | 4,60 | 0,59 |
| | | | Σ | 60,5 | 8,2 |

Исследование способов интенсификации теплообмена в отдельных аппаратах теплотехнологической схемы газоразделения производства этилена

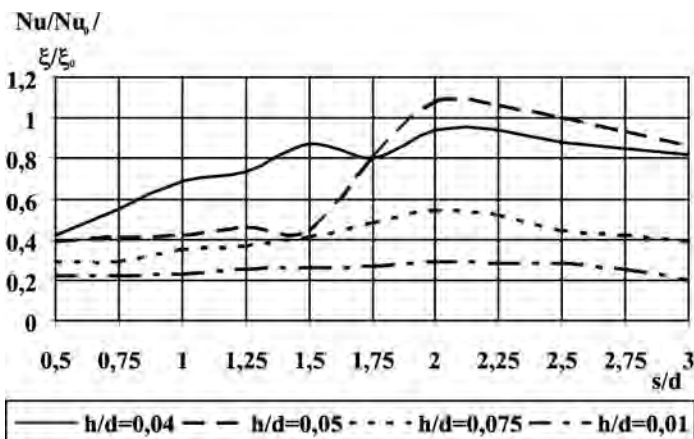
В соответствии с разработанным алгоритмом проведено исследование интенсификации теплообмена в аппаратах теплотехнологической схемы стадии газоразделения в производстве этилена. В качестве объектов исследования выбраны три теплообменных аппарата: № 1 ($Re = 1376$), №2 ($Re = 1482$) и №3 ($Re = 661$), интенсификация теплообмена в которых не приводит к изменениям в основной технологической линии рассматриваемого производства. В ходе предварительного анализа различных методов интенсификации для численного исследования в качестве интенсификаторов теплообмена в трубных каналах теплообменных аппаратов выбрана поперечная дискретная шероховатость двух видов – поперечная кольцевая накатка и накатка в форме прямоугольного треугольника первого типа.

Рабочая среда – вода; внутренний диаметр трубы $d = 0,016; 0,021$ м, выбор которых обусловлен их широким практическим распространением. Относительная высота треугольных и кольцевых выступов $h/d = 0,04...0,1$, относительный шаг накатки $s/d = 0,5...3$, относительная ширина треугольных выступов $b/d = 0,05...0,25$. При чис-

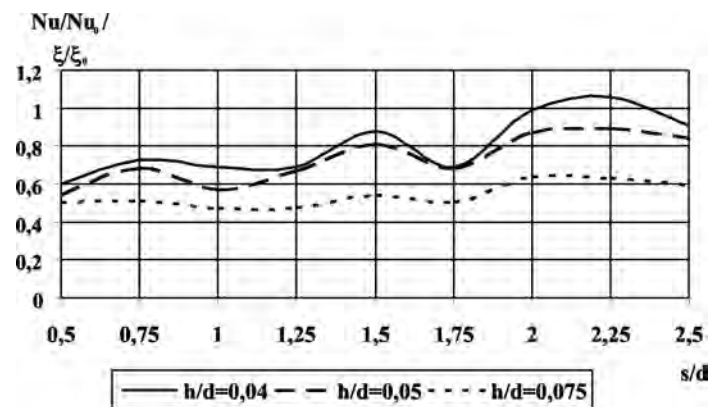
ленном исследовании использована модель, разработанная коллективом ведущей научной школы «Тепломассообмен и теплоэнергетика» имени чл. кор. РАН Ю.Г. Назмеева. При постановке задачи система уравнений движения, неразрывности и переноса энергии жидкости записана в цилиндрической системе координат с учетом следующих допущений: течение ламинарное, стационарное, осесимметричное, теплофизические параметры (плотность, теплоемкость, теплопроводность) в ходе процесса меняются незначительно.

Для иллюстрации полученных данных на рис. 2 представлены результаты исследования интенсификации теплообмена притечении жидкости в трубном канале холодильника №1. Из рисунка видно, что для интенсификаторов полукруглой формы (рис. 2, а) наибольшая теплогидродинамическая эффективность $\eta = \frac{Nu}{Nu_0} / \frac{\xi}{\xi_0}$

наблюдается при относительной высоте $h/d = 0,05$ и относительном шаге $s/d = 2$ ($\eta = 1,08$). При относительных высотах $h/d = 0,04; 0,075$ и $0,1$ интенсификация не эффективна, значение не превышает единицы. В случае выступов треугольной формы (рис. 2, б) наибольшее значение критерия теплогидродинамической эффективности ($\eta = 1,06$) наблюдается при $b = 0,15d$, $h/d = 0,04$ и $s/d = 2,25$. В остальных случаях $\eta < 1$.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости η от s/d и h/d для аппарата №1: а) кольцевая накатка, б) треугольная накатка $b=0,15d$.

Табл. 2. Влияние геометрической формы интенсификаторов на коэффициент теплоотдачи

| ТОА | Гладкий канал α_0 | Форма интенсификаторов | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|
| | | полукруг | | треугольник | |
| | | η | $\alpha_{инт}$ | η | $\alpha_{инт}$ |
| №1 $d=21$ мм $d=16$ мм | 456 | 1,08 | 610 | 1,06 | 546 |
| | 553 | 1,03 | 663 | 1,00 | 658 |
| №2 $d=21$ мм $d=16$ мм | 465 | 1,08 | 595 | 1,09 | 608 |
| | 535 | 1,03 | 659 | 1,00 | 647 |
| №3 $d=21$ мм $d=16$ мм | 295 | 1,04 | 325 | 1,03 | 325 |
| | 345 | 0,96 | 371 | 0,97 | 370 |

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа влияния геометрической формы интенсификаторов на рост коэффициента теплоотдачи α в ТОА для труб с различными диаметрами при наибольших значениях η .

Из таблицы видно, что для теплообменного аппарата №1 наибольшее значение $\eta = 1,08$ достигается при использовании интенсификаторов полукруглой формы при $d = 21$ мм. Для аппарата №2 наибольшее увеличение коэффициента α дают интенсификаторы треугольной формы, также при $d = 21$ мм. Для аппарата №3 значения η или меньше единицы (при $d = 16$ мм) или близки к ней, вследствие чего интенсифицировать данный аппарат кольцевой или треугольной накаткой нецелесообразно.

Анализ показал, что использование интенсифицированных теплообменных аппаратов позволит снизить расход воды в теплообменниках №1 и №2 на 40 и 46 % и сократить потери теплоты на 3,8 МВт, эксергии на 0,4 МВт. Таким образом, интенсификация теплообмена приводит к экономии первичных ресурсов, используемых на стадии газоразделения.

Разработка системы утилизации низкопотенциальных ВЭР

В результате сравнительного технико-экономического анализа выбран эффективный метод использования низкопотенциальных ВЭР на основе применения парожеткорной установки и термосифона, на базе которого разработана система комплексной утилизации. Данная система, включающая участок гидрирования этан-этиленовой фракции стадии газоразделения с применением термосифона и ПЭУ (рис. 3), позволяет за счет утилизации парового конденсата, экономить оборотную воду и осуществлять отпуск теплоты для ГВС.

Порядок работы СКУ следующий: часть отработанного парового конденсата из кипятильника 5 поступает в водоструйный паровой эжектор 7, в который также поступает обратная вода из холодильников 3 и 6. Из парового эжектора выходит нагретая вода и поступает затем в испаритель термосифона 8. За счет подвода теплоты вскипает промежуточный теплоноситель, и пар теплоносителя перемещается

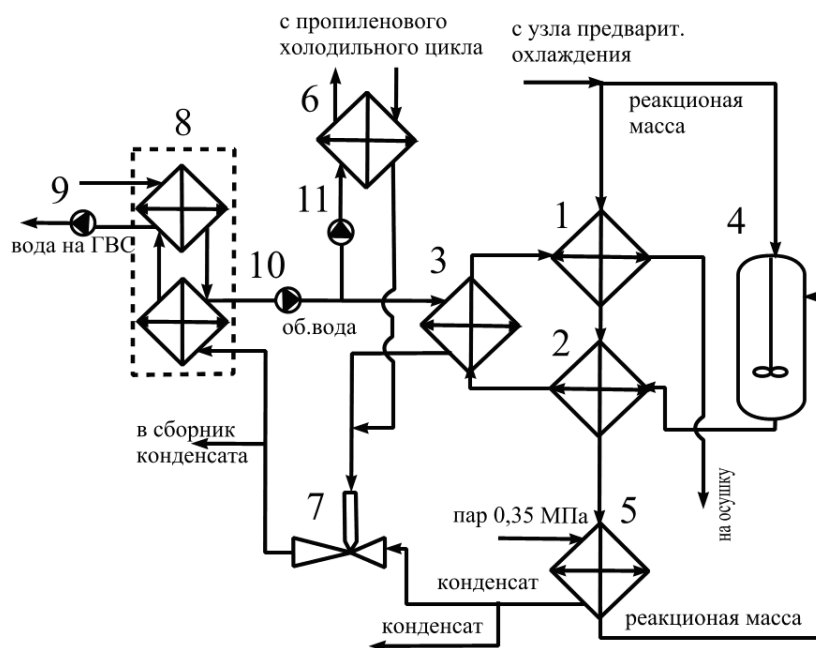


Рис. 3. СКУ для теплотехнологической схемы стадии газоразделения:
1, 2 – теплообменник обратных потоков; 3, 6 – холодильник; 4 – реактор;
5 – кипятильник; 7 – ПЭУ; 8 – термосифон; 9, 10, 11 – насос.

по теплоизолированной зоне в конденсатор термосифона, где при его конденсации происходит передача теплоты холодной воде. Нагретая вода насосом 9 направляется на горячее водоснабжение завода. Конденсат промежуточного теплоносителя под действием сил гравитации перемещается в испаритель термосифона, замыкая процесс передачи теплоты. Охлажденная вода из испарительной части термосифона поступает снова в холодильники 3 и 6.

Для теплотехнологической схемы газоразделения с учетом разработанной системы утилизации проведен дополнительный анализ струк-

туры связей между элементами, тепловой и термодинамические расчеты. Расчеты показали, что при использовании в замкнутом цикле парового конденсата и оборотной воды тепловой КПД блока гидрирования этан-этиленовой фракции увеличится на 8 %, а эксергетический – на 12 %. Количество утилизируемой в СКУ теплоты оставляет 11,5 МВт, эксергии – 1,5 МВт.

Проведена технико-экономическая оценка предлагаемых мероприятий, результаты которой представлены в табл. 3.

Табл. 3. Технико-экономические показатели СКУ

| Показатель | Величина | Размерность |
|----------------------------------|----------|---------------|
| Капитальные затраты | 2,046 | млн. руб. |
| Годовые эксплуатационные расходы | 0,314 | млн. руб./год |
| Экономия | 1,129 | млн. руб./год |
| Срок окупаемости | 2,5 | лет |

Технико-экономический анализ показал быструю окупаемость предлагаемых мероприятий за счет сокращения расходов оборотной воды и выработки дополнительной теплоты на ГВС и отопление.

Выводы

1. Разработан алгоритм решения задачи по повышению эффективности энергоиспользования на промышленном предприятии нефтехимического комплекса, базирующийся на теории тепло- и массообмена, технической термодинамики, методологии системного анализа и методов математического моделирования.

2. С целью минимизации влияния на технологический процесс производства этилена целесообразно использование интенсификации теплообмена применительно к водяным холодильникам, входящих в пропиленовый и этиленовый холодильные циклы. Анализ результатов исследований показал, что использование интенсификации теплообмена целесообразно для аппаратов №1 и №2, входящих в указанные выше технологические участки. При этом внутренний диаметр труб должен составлять 0,021 м, а в качестве интенсификаторов необходимо использовать кольцевую накатку как наиболее эффективную и технологичную при изготовлении и обслуживании.

3. Для повышения энергетической эффективности участка гидрирования этан-этиленовой фракции посредством утилизации низкопотенциальных ВЭР наиболее эффективно комбинированное использование термосифона и ПЭУ. Разработана оригинальная СКУ низкопотенциальных ВЭР; срок окупаемости СКУ – 2,5 года.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия отечественной науки, ФАНИ (госконтракты №№ 02.740.11.0062, 02.740.11.0071) и РФФИ (грант № 08-08-12109 – офи).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Багиев Г.Л., Златопольский А.Н.* Организация, планирование и управление промышленной энергетикой: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

2. *Назмеев Ю.Г.* Мазутные хозяйства ТЭС. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

3. *Иванова С.И., Шамсутдинов Э.В.* Комплексный подход к энерго- и ресурсосбережению для стадии газоразделения в производстве этилена // Материалы VI школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 16-18 сентября 2008г. – С. 426-428.

Получено 06.10.2009 г.