

## ВЛИЯНИЕ УТЕЧЕК И МЕЖКОНТУРНЫХ ПЕРЕТОКОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕГО СОСТОЯНИЯ

Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В.

*Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия*

*e-mail: [annaannaaver@gmail.com](mailto:annaannaaver@gmail.com)*

В работе рассмотрено влияние утечек теплоносителя во внешнюю среду и межконтурных перетоков на температурные характеристики теплообменного аппарата. Для оценки изменения температур теплоносителей на выходе и температурного напора разработаны модели в Aspen HYSYS для случаев утечки греющего и нагреваемого теплоносителей, а также перетока греющего теплоносителя в нагреваемый и нагреваемого теплоносителя в греющий, экспериментальная проверка выполнена на разработанном стенде для случая утечки греющего теплоносителя. Установлено, что утечка греющего теплоносителя приводит к снижению температур обоих теплоносителей на выходе и температурного напора; утечка нагреваемого теплоносителя – к увеличению выходных температур при снижении температурного напора; межконтурные перетоки – к снижению температуры греющей среды, увеличению температуры нагреваемой среды и снижению температурного напора. Экспериментальные результаты подтвердили направление изменения температур и температурного напора при утечке греющего теплоносителя. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния теплообменных аппаратов и способствовать переходу от регламентного ремонта к ремонту по фактическому состоянию.

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат, температурный напор, температура, диагностика.

## EFFECT OF LEAKS AND INTER-CIRCUIT CROSS-LEAKAGE ON THE THERMAL CHARACTERISTICS OF A HEAT EXCHANGER FOR CONDITION DIAGNOSTICS

Litvinenko A.A., Vankov Yu.V.

*Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia*

The study examines the effect of heat-transfer fluid leakage into the environment and inter-circuit cross-leakage on the thermal characteristics of a heat exchanger. To evaluate changes in the outlet temperatures of the heat-transfer fluids and in the temperature difference, Aspen HYSYS models were developed for hot-side and cold-side leakage, as well as for hot-to-cold and cold-to-hot inter-circuit cross-leakage. Experimental verification was carried out on the developed test rig for the case of hot-side leakage. It was established that hot-side leakage leads to a decrease in the outlet temperatures of both heat-transfer fluids and in the temperature difference; cold-side leakage leads to an increase in the outlet temperatures while the temperature difference decreases; inter-circuit cross-leakage leads to a decrease in the hot-side temperature, an increase in the cold-side temperature, and a decrease in the temperature difference. The experimental results confirmed the direction of changes in the temperatures and in the temperature difference in the case of hot-side leakage. The identified regularities can be used in the development of an algorithm for a heat exchanger condition diagnostic system and can support the transition from scheduled maintenance to condition-based maintenance.

**Keywords:** heat exchanger, temperature head, log mean temperature difference, diagnostics.

### Введение

Повышение энергоэффективности и надежности работы тепломеханического оборудования является одной из ключевых задач современной теплоэнергетики и промышленности. Теплообменные аппараты (ТОА) применяются в системах отопления, вентиляции и кондиционирования зданий, в котельных и тепловых сетях, химических и нефтеперерабатывающих производствах, металлургии, а также в пищевой и фармацевтической промышленности. Эксплуатация ТОА сопровождается образованием различных отложений на теплообменной поверхности, которые создают дополнительное термическое сопротивление, что ведет к снижению общего коэффициента теплопередачи, уменьшению проходного сечения и увеличению гидравлического сопротивления [1,2], а также могут наблюдаться

утечки теплоносителя в окружающую среду или переток из одного контура в другой [3-5]. Эффективность работы ТОА напрямую определяет общий КПД установки, удельный расход топлива и, как следствие, эксплуатационные затраты. В условиях роста тарифов на энергоносители и ужесточения экологических норм даже незначительное ухудшение характеристик ТОА приводит к существенным финансовым потерям для предприятия [6].

Широкое распространение ТОА в промышленности, наличие проблем технического состояния при эксплуатации требуют проведения их своевременной диагностики.

Рассмотрим современные методы диагностики ТОА. *Акустические методы* неразрушающего контроля базируются на анализе и обработке механических волн, возникающих в объекте контроля [7,8].

*Визуальные методы* предусматривают диагностику с применением видеоскопов [9]. *Системы с использованием многофункциональных вихревых приборов-дефектоскопов* [10] позволяют оценивать внутреннее утонение стенки в процентном соотношении, степень закупорки трубок, диаметр и размер дефекта, а также расстояние до него. Такие дефектоскопы работают на основе электромагнитной индукции.

В настоящее время известно применение *искусственного интеллекта* (ИИ) для диагностики ТОА. В работах [11,12] рассматривается использование ИИ для прогнозирования технического обслуживания оборудования. Отдельную группу составляют *параметрические методы диагностики*. В работах [13-15] для диагностики технического состояния теплообменных аппаратов используются эксплуатационные параметры, прежде всего температуры входящих и выходящих потоков. Текущие значения сравниваются с эталонными, а выявленные отклонения используются для обнаружения загрязнений, утечек и снижения эффективности теплообмена.

Перспективным направлением является непрерывная *параметрическая диагностика* в реальном времени, авторами [16,17] предлагается проводить диагностику по тепловым и гидравлическим характеристикам, преимуществом такого подхода является возможность использования уже развернутой приборной базы, поскольку датчики температуры и давления, как правило, присутствуют в стандартной обвязке ТОА. Это минимизирует затраты на внедрение системы и повышает ее практическую значимость.

*Цель работы* заключается в установлении закономерностей изменения температур на выходе и среднелогарифмического температурного напора (ТН) при утечках теплоносителя и межконтурных перетоках путем разработки моделей в Aspen HYSYS и их экспериментального подтверждения на примере утечки греющей среды.

*Научная значимость* работы заключается в установлении закономерностей изменения температур на выходе и ТН ТОА при наличии утечек теплоносителя во внешнюю среду и межконтурных потоков.

*Практическая значимость*: результаты данной работы могут быть использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния ТОА. Внедрение такой системы позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что увеличит межремонтный пробег оборудования.

#### **Материалы и методы**

Данная работа является продолжением исследования [18] по оценке влияния эксплуатационных неисправностей на ТН и температуры на выходе греющей и нагреваемой среды.

Для получения данных по ТН и температурам на выходе разработаны модели в Aspen HYSYS V12, характеризующие утечку греющей среды (рис. 1а), утечку нагреваемой среды (рис. 1б), переток греющей среды в нагреваемую (рис. 2а), переток нагреваемой среды в греющую (рис. 2б). Для имитации наличия утечки теплообменник разделен на две части, сумма тепловой нагрузки разделенного теплообменника равна тепловой нагрузке исходного аппарата. Элемент «тройник» разделяет основной поток среды на два потока, первый – в атмосферу (имитируя утечку), второй продолжает движение по основному каналу к выходу теплообменника. Для имитации перетока теплоносителя между контурами использованы элементы «тройник» и «смеситель». С помощью элемента «тройник» часть потока одного теплоносителя отводится из основного канала и направляется в элемент «смеситель», где осуществляется его подмес к потоку другого теплоносителя. Для расчета модели использовались следующие исходные данные: теплообменный аппарат ТТР-27-10 производителя «Завод Термосистемы», количество пластин – 10, площадь теплообмена 0.25 м<sup>2</sup>; температура на входе греющего теплоносителя – 50°C, температура на входе нагреваемого теплоносителя – 45°C, расход греющего теплоносителя – 0.26 кг/с, расход нагреваемого теплоносителя – 0.29 кг/с, коэффициент теплопередачи – 3500 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), удельная теплоемкость теплоносителей – 4190 Дж/кг·°C.

С целью экспериментального подтверждения направления изменения ТН и температур на выходе разработан стенд, на котором проведены эксперименты по получению эталонных значений теплообменного аппарата при его нормальной работе и при утечке греющей среды. На рис. 3а, 3б представлена принципиальная схема и внешний вид стенда.

Описание стенда: циркуляционным насосом 4а греющий теплоноситель подается в электрический водогрейный котел 1 для нагрева, из котла теплоноситель направляется в теплообменник 2, отдает тепло нагреваемому контуру и движется к насосу 4а. Циркуляционным насосом 4б нагреваемый теплоноситель подается в теплообменник 2, нагревается за счет теплоносителя греющего контура, затем направляется в радиатор с вентилятором 3 для охлаждения и движется к циркуляционному насосу 4б. Датчики давления ПД100-ДИ0.4-181-0.5, температуры ДТС054-РТ1000.ВЗ.60/2.Г1/2 и расходомеры Asarps подключены к модулю расширения ПРМ-24.3 и программируемому реле ПР205-24.1211.06.2.0. Все параметры отображаются на экране программируемого реле и дублируются по каналу Ethernet в облачное хранилище Owen Cloud.

#### **Результаты и Обсуждение**

Для оценки влияния места утечки/перетока на выходные параметры теплообменника были рассмотрены три варианта координаты:  $x=0.05$  м

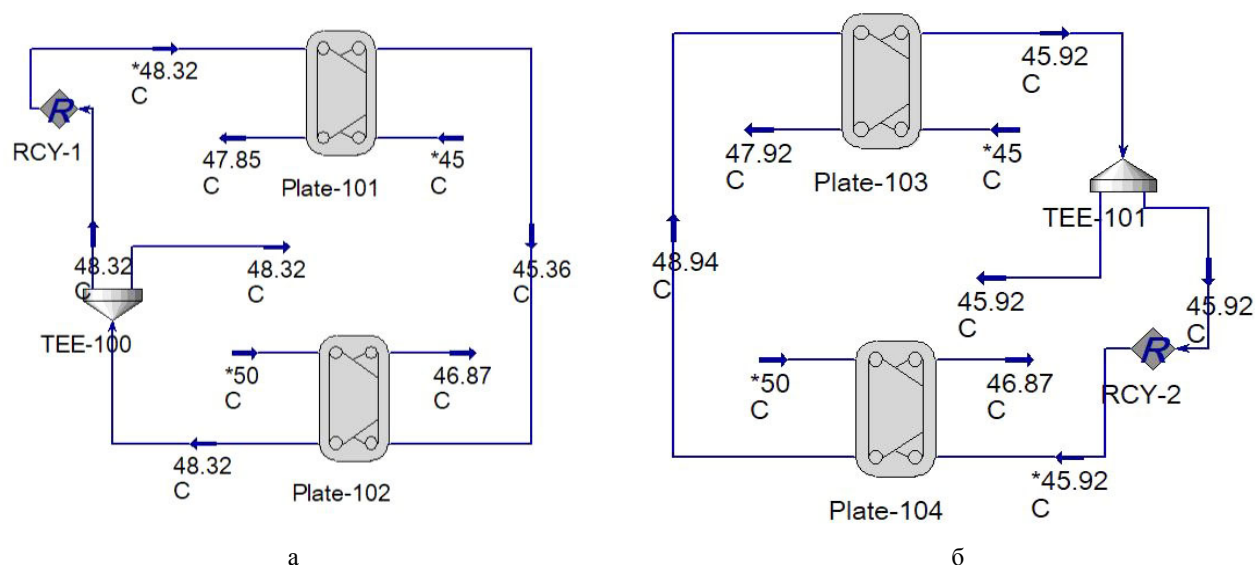


Рис. 1а, б. Модель теплообменного аппарата, характеризующая утечку греющего (слева) и нагреваемого (справа) теплоносителя

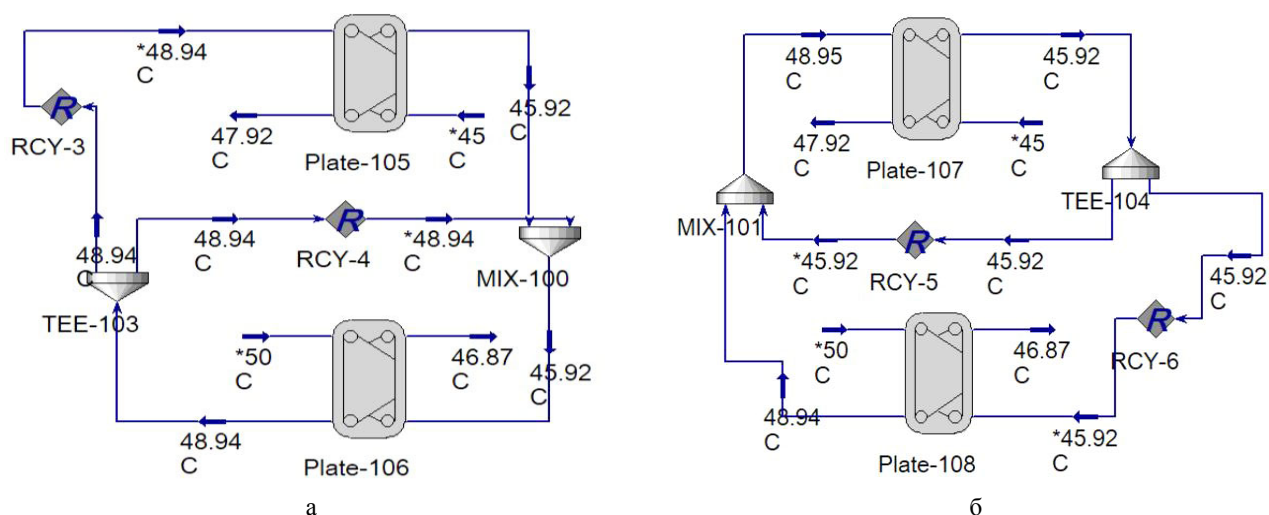


Рис. 2а, б. Модель теплообменного аппарата, характеризующая переток греющего теплоносителя в нагреваемый (слева) и нагреваемого теплоносителя в греющий (справа)

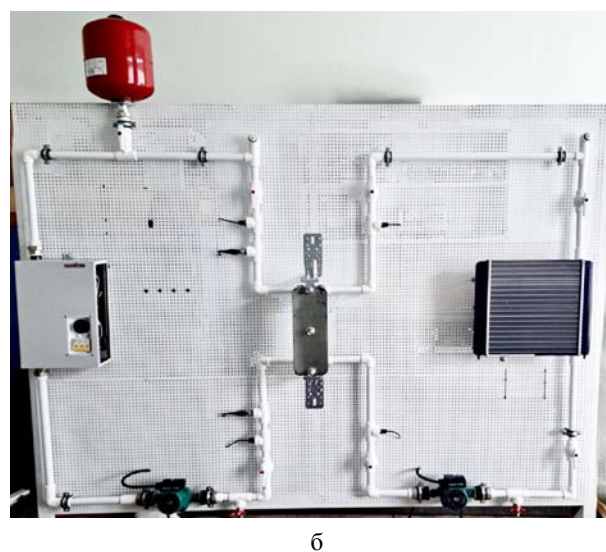
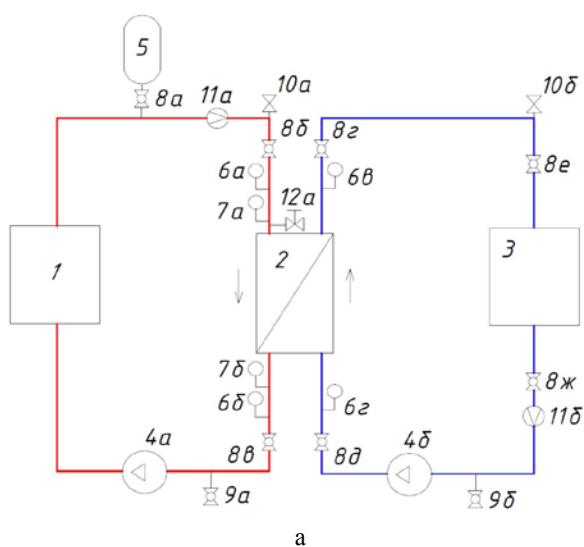


Рис. 3а, б. Принципиальная схема и внешний вид стенда: 1 – котел; 2 – теплообменный аппарат; 3 – радиатор охлаждения с вентилятором; 4а, 4б – циркуляционные насосы; 5 – расширительный бак; 6а, 6б, 6в, 6г – датчики температуры; 7а, 7б – датчики давления; 8а, 8б, 8в, 8г, 8е, 8ж – кран шаровой Ду25; 9а, 9б – кран шаровой Ду15; 10а, 10б – кран Маевского; 11а, 11б – расходомеры; 12а – клапан регулирующий

(соответствует утечке/перетоку теплоносителя ближе к входу);  $x=0.13$  м (соответствует утечке/перетоку теплоносителя посередине);  $x=0.21$  м (соответствует утечке/перетоку теплоносителя ближе к выходу). Моделирование выполнялось для доли утечки и перетока 1%, 3%, 5%. На рис. 4 представлен график изменения температуры на выходе греющего теплоносителя, на рис. 5 – график изменения температу-

ры на выходе нагреваемого теплоносителя, на рис. 6 – график изменения ТН. На графиках показаны результаты моделирования в Aspen HYSYS для следующих случаев: нормальная работа теплообменного аппарата, утечка греющей среды, утечка нагреваемой среды, переток греющей среды в нагреваемую, переток нагреваемой среды в греющую. Установлено, что чем ближе к входу среды находится дефект,

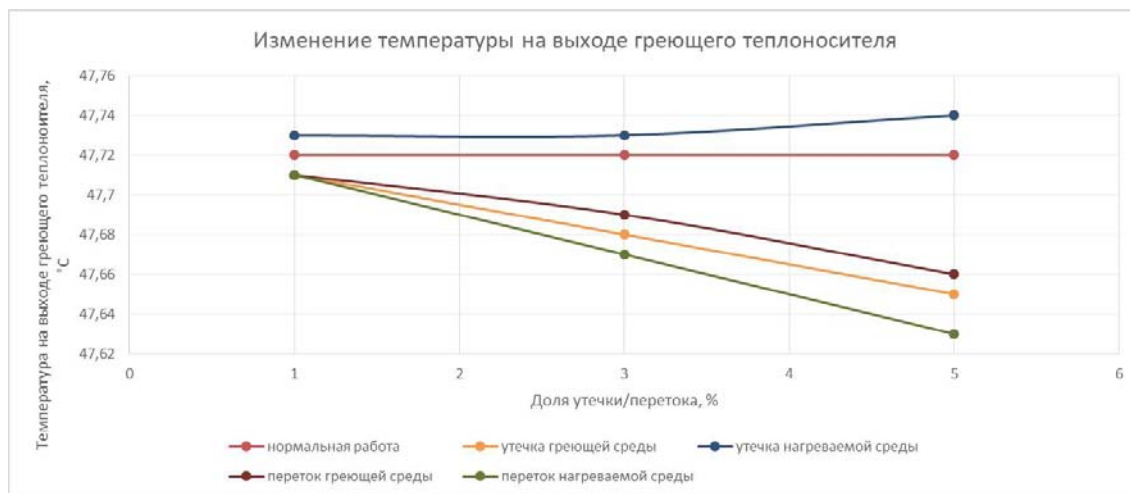


Рис. 4. Изменение температуры на выходе греющего теплоносителя

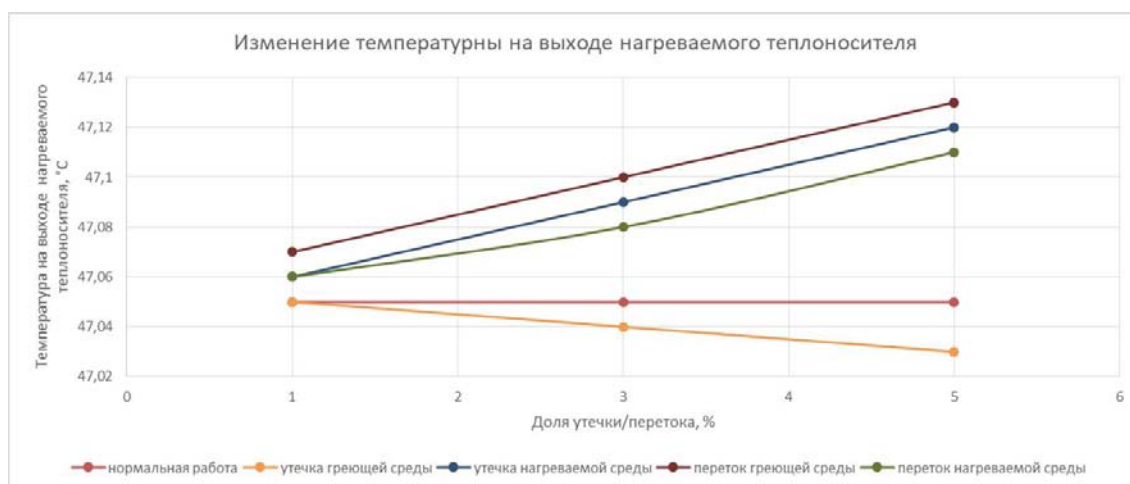


Рис. 5. Изменение температуры на выходе нагреваемого теплоносителя

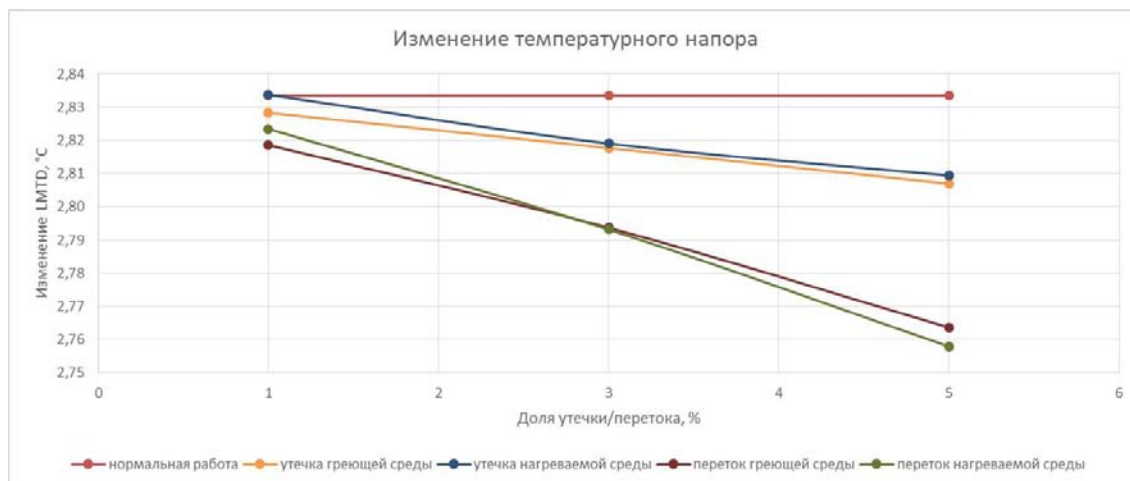


Рис. 6. Изменение температурного напора

тем сильнее он оказывает влияние на выходные параметры, поэтому на графиках приведены данные утечки или межконтурного перетока, соответствующие входу теплоносителя.

Утечка греющего теплоносителя приводит к снижению температур обоих теплоносителей на выходе и ТН. При увеличении доли утечки до 5% температура греющей среды на выходе снижается на  $0.07^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой среды – на  $0.02^{\circ}\text{C}$ , а температурный напор – на  $0.02^{\circ}\text{C}$ . Утечка нагреваемого теплоносителя приводит к увеличению температур обоих теплоносителей на выходе и уменьшению ТН. При увеличении доли утечки до 5% температура нагреваемой среды на выходе увеличивается на  $0.07^{\circ}\text{C}$ , температура греющей среды – на  $0.02^{\circ}\text{C}$ , а температурный напор – на  $0.02^{\circ}\text{C}$ . При перетоке греющего теплоносителя в нагреваемый наблюдается разнонаправленное изменение выходных температур: температура греющей среды снижается, а нагреваемой – возрастает. При перетоке 5% изменения составляют соответственно  $0.06^{\circ}\text{C}$  и  $0.08^{\circ}\text{C}$ , одновременно температурный напор уменьшается на  $0.07^{\circ}\text{C}$ . При перетоке нагреваемого теплоносителя в греющий температура греющей среды на выходе снижается, тогда как температура нагреваемой среды на выходе возрастает. При увеличении доли перетока до 5% изменения составляют  $0.09^{\circ}\text{C}$  и  $0.07^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Температурный напор уменьшается на  $0.07^{\circ}\text{C}$ .

На первом этапе экспериментальной части были проведены серии опытов в исправном состоянии теплообменного аппарата. По экспериментальным данным был определен эксплуатационный коэффициент теплопередачи  $K=3593 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ . Коэффициент определялся по тепловому потоку, принятому как среднее значение тепловых потоков греющей и нагреваемой сред.

На втором этапе проводились эксперименты с имитацией утечки греющего теплоносителя. Для этого непосредственно перед входом в теплообменный аппарат в греющий контур был установлен регулирующий клапан, через который осуществлялся отбор части теплоносителя (на рис. 3а обозначен как

12а). Для определения массового расхода утечки теплоноситель трижды собирали в емкость в течение 1 мин; массу собранного теплоносителя определяли взвешиванием. Исследованы три уровня утечки – 1.782%; 3.062% и 3.562%, которым соответствовали средние массовые расходы утечки 0.293 кг/мин; 0.520 кг/мин и 0.603 кг/мин. Для каждого уровня выполнено по три независимых эксперимента. Для исключения влияния различий входных режимных параметров для каждого экспериментального режима дополнительно рассчитывался соответствующий эталон исправного состояния при фактических значениях входных температур и расходов. Далее при тех же входных условиях моделировалась утечка греющей среды, после чего расчетные значения выходных температур и ТН сопоставлялись с экспериментальными данными.

В таблице 1 представлены данные по ТН (в диапазоне  $50\text{--}52^{\circ}\text{C}$ ) по трем сериям экспериментов, для оценки воспроизводимости эталонных значений определены среднее арифметическое  $\bar{X}$ , среднее квадратическое отклонение  $S$ , СКО среднего арифметического  $S_x$ , критерии Граббса  $G_{\max}$ ,  $G_{\min}$  и теоретическое значение  $G_m$ , доверительная граница случайной погрешности  $\varepsilon$  [19].

На рис. 7 представлено сравнение ТН при нормальной работе и при утечке горячего теплоносителя, синим обозначены точки, характеризующие эталонное значение ТН, красным – значение ТН при утечке, вертикальные отрезки отражают доверительные границы случайной погрешности среднего значения.

Анализ показал, что возникновение утечки греющего теплоносителя приводит к снижению ТН теплообменного аппарата. При увеличении доли утечки от 1.782 до 3.562% экспериментальное снижение ТН возрастает от  $0.012^{\circ}\text{C}$  до  $0.017^{\circ}\text{C}$ , что соответствует относительному изменению от 0.519% до 0.768%. Аналогичная закономерность получена при математическом моделировании: расчетное снижение ТН составляет от  $0.01^{\circ}\text{C}$  до  $0.019^{\circ}\text{C}$ , или 0.444 – 0.843%. Максимальное различие между расчетным и экспериментальным изменением температурного

Таблица 1

Значения температурного напора, полученные в ходе эксперимента с утечкой греющей среды

| Серия экспериментов | Номер эксперимента | ТН ( $50\text{--}52^{\circ}\text{C}$ ) | Доля утечки, % | $\bar{X}$ | $S$   | $S_x$ | $G_{\max}$ | $G_{\min}$ | $G_t$ | $\varepsilon$ |
|---------------------|--------------------|----------------------------------------|----------------|-----------|-------|-------|------------|------------|-------|---------------|
| 1                   | 1                  | 2.25                                   |                |           |       |       |            |            |       |               |
| 1                   | 2                  | 2.246                                  | 1.782          | 2.248     | 0.002 | 0.001 | 0.801      | 1.121      | 1.155 | 0.005         |
| 1                   | 3                  | 2.249                                  |                |           |       |       |            |            |       |               |
| 2                   | 1                  | 2.218                                  |                |           |       |       |            |            |       |               |
| 2                   | 2                  | 2.221                                  | 3.062          | 2.219     | 0.002 | 0.001 | 1.121      | 0.801      | 1.155 | 0.005         |
| 2                   | 3                  | 2.217                                  |                |           |       |       |            |            |       |               |
| 3                   | 1                  | 2.259                                  |                |           |       |       |            |            |       |               |
| 3                   | 2                  | 2.258                                  | 3.562          | 2.256     | 0.005 | 0.003 | 0.676      | 1.149      | 1.155 | 0.012         |
| 3                   | 3                  | 2.25                                   |                |           |       |       |            |            |       |               |

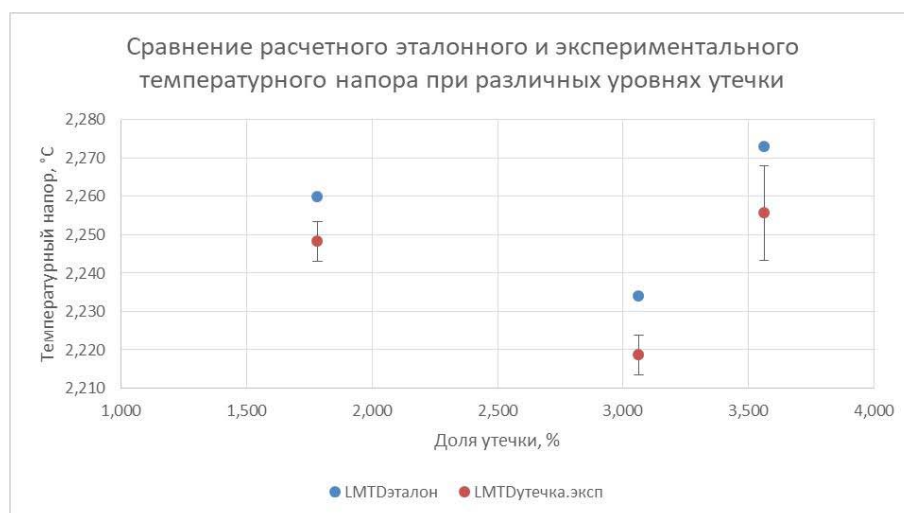


**Рис. 7.** Сравнение расчетного эталонного и экспериментального температурного напора при различных уровнях утечки

напора не превышает 0.002°C. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают установленную моделью закономерность снижения ТН при утечке греющего теплоносителя.

Аналогично, были проанализированы выходные температуры греющей и нагреваемой среды, экспериментальные исследования подтвердили направление изменения температур на выходе, установленное моделированием. При увеличении утечки греющего теплоносителя во всех исследованных режимах наблюдалось снижение температуры греющей среды на выходе  $T_2$  и температуры нагреваемой среды на выходе  $T_4$ . Для утечек 1.782-3.562% экспериментальные изменения  $T_2$  составили от -0.080°C до -0.117 °C, а  $T_4$  – от -0.061 до -0.093°C. Таким образом, направление изменения выходных температур соответствует признакам, полученным в работе [18], при моделировании в Aspen HYSYS и в ходе эксперимента.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями выходных температур  $T_2$  и  $T_4$  обусловлено различием между условиями математической модели и реального экспериментального стенда. В математической модели принимается идеальный тепловой баланс теплообменного аппарата, при котором тепловой поток, отдаваемый греющим теплоносителем, полностью передается нагреваемой среде:  $Q_1=Q_2$ . В экспериментальных условиях данное равенство выполняется не полностью: расхождение теплового баланса составляло порядка 5-8%. Это связано с наличием тепловых потерь в окружающую среду через теплообменный аппарат и трубопроводы, тепловой инерционностью элементов стенда. При этом как математическое модели-

рование, так и эксперимент показывают снижение температур  $T_2$  и  $T_4$  при увеличении утечки греющего теплоносителя.

### Заключение или Выводы

Разработанная модель в Aspen HYSYS позволила установить характерные направления изменения выходных температур и температурного напора при утечках и межконтурных перетоках. При утечке греющей среды снижаются температуры обоих теплоносителей на выходе; при утечке нагреваемой среды выходные температуры увеличиваются, для межконтурных перетоков независимо от направления перетока характерно снижение температуры греющей среды на выходе, увеличение температуры нагреваемой среды на выходе. Для всех рассмотренных случаев температурный напор уменьшается относительно значения, полученного при нормальной работе теплообменника.

Экспериментальная проверка для утечки греющего теплоносителя подтвердила расчетное направление изменения температурных параметров. При увеличении доли утечки от 1.782% до 3.562% экспериментальное снижение температурного напора составило 0.012-0.017°C (0.519-0.768%), а расчетное – 0.010-0.019°C (0.444-0.843%).

Сочетания направлений изменения выходных температур и температурного напора могут использоваться как диагностические признаки для различения внешней утечки и межконтурного перетока. Полученные экспериментальные и расчетные результаты использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния ТОА [16,17].

### Список литературы

1. Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Уваров В.А., Щербинина О.А. Экономический аспект диагностики накипеобразующих слоев в пластинчатых теплообменниках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. №5. 2023. С. 42-51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51.
2. Тарасенко Н.В. Влияние отложений накипи на надежность и эффективность работы теплообменного оборудования / Тарасенко Н.В., Гунько И.В., Родионова Т.В. // НАУКА И ИННОВАЦИИ В XXI ВЕКЕ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ОТКРЫТИЯ И ДОСТИЖЕНИЯ сборник статей IX Международной научно-практической конференции. 2018. С. 24-26.

3. Thekkuden D.T., Mourad A.H.I., Bouzid A.H. Failures and leak inspection techniques of tube-to-tubesheet joints: A review. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 130. 105798. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105798.
4. Shu L., Zhu X., Huang X., Zhou Z., Zhang Y., Wang X. A Review of Research on Acoustic Detection of Heat Exchanger Tube. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. 2015. 2(5). e5. DOI: 10.4108/eai.17-9-2015.150287.
5. Mansour M., Khalifa W. Leaking of 316L stainless steel heat exchanger tubes in carbon dioxide process, *Scientific Reports*. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-21376-w.
6. Минко В.А. Влияние отложений на рабочих поверхностях системы отопления на показатели работы элементов системы / Минко В.А., Семенов А.С., Гулько И.В., Елистратова Ю.В. // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. №5. 2014. С.32-35.
7. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024. 26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>.
8. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. 22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>.
9. Интернет-ресурс: [https://prokontrol.ru/works/kontrol\\_teploobmennikov\\_i\\_ekonomajzerov/](https://prokontrol.ru/works/kontrol_teploobmennikov_i_ekonomajzerov/).
10. Интернет-ресурс: <http://galasndt.ru/index.php?id=207&ysclid=ly8eoqxli304842528>.
11. da Silva, Samuel & Fuzaro de Almeida, Estênio & Godoy, Vitória. (2025). Transfer Learning of Digital Shadows for Fouling Monitoring in Heat Exchangers. DOI: 10.13140/RG.2.2.18842.96963.
12. Lodhi, Shahruxh Khan & Hussain, Hafiz Khawar & Hussain, Ibrar. (2024). Using AI to Increase Heat Exchanger Efficiency: An Extensive Analysis of Innovations and Uses. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*. 3. 1-14. DOI:10.47709/ijmdsa.v3i4.4617.
13. Пат. 2771269, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики состояния рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург», № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022.
14. Демин А.М., Науменко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив // *Омский научный вестник*. №4. 2019. С. 85.
15. Интернет-источник: <https://dynamicsru.com/news/heat-exchanger-monitoring/>.
16. Пат. №2808982. Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа». №2808982. опубл. 05.12.2023.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693197 Российская Федерация. Автоматическая система диагностики технического состояния рекуперативного теплообменного аппарата: заявлено 14.11.2025: опубликовано 26.11.2025 / Литвиненко А.А.; правообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа».
18. A.A. Litvinenko, Y.V. Vankov and A.R. Timershin. «Theoretical Study of the Effects of Off-Design Conditions Induced by Deposits, Coolant Leaks, and Cross-Leaks on Heat Exchanger Performance». 2026 8th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2026. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE69046.2026.11481262.
19. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 2011-12-01. М.: Стандартинформ. 2011. 20 с.

## References

1. Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Shcherbinina O.A. The economic aspect of diagnostics of scale-forming layers in plate heat exchangers. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. No. 5. 2023. Pp. 42-51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51.
2. Tarasenko N.V., Gunko I.V., Rodionova T.V. *Vliyaniye otlozheniy nakipi na nadezhnost' i effektivnost' raboty teploobmennogo oborudovaniya* [The influence of scale deposits on the reliability and efficiency of heat exchange equipment]. *SCIENCE AND INNOVATION IN THE 21st CENTURY: CURRENT ISSUES, DISCOVERIES AND ACHIEVEMENTS* Collection of articles of the IX International Scientific and Practical Conference. 2018. Pp. 24-26.
3. Thekkuden D.T., Mourad A.H.I., Bouzid A.H. Failures and leak inspection techniques of tube-to-tubesheet joints: A review. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 130. 105798. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105798.
4. Shu L., Zhu X., Huang X., Zhou Z., Zhang Y., Wang X. A Review of Research on Acoustic Detection of Heat Exchanger Tube. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. 2015. 2(5). e5. DOI: 10.4108/eai.17-9-2015.150287.
5. Mansour M., Khalifa W. Leaking of 316L stainless steel heat exchanger tubes in carbon dioxide process, *Scientific Reports*. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-21376-w.
6. Minko V.A., Seminenko A.S., Gunko I.V., Elistratova Yu.V. The influence of deposits on the working surfaces of the heating system on the performance of the system elements. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. No. 5. 2014. Pp. 32-35.
7. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the method of free oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024. 26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>.
8. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020. 22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>.
9. Internet resource: [https://prokontrol.ru/works/kontrol\\_teploobmennikov\\_i\\_ekonomajzerov/](https://prokontrol.ru/works/kontrol_teploobmennikov_i_ekonomajzerov/).
10. Internet resource: <http://galasndt.ru/index.php?id=207&ysclid=ly8eoqxli304842528>.
11. da Silva, Samuel & Fuzaro de Almeida, Estênio & Godoy, Vitória. (2025). Transfer Learning of Digital Shadows for Fouling Monitoring in Heat Exchangers. DOI: 10.13140/RG.2.2.18842.96963.
12. Lodhi, Shahruxh Khan & Hussain, Hafiz Khawar & Hussain, Ibrar. (2024). Using AI to Increase Heat Exchanger Efficiency: An Extensive Analysis of Innovations and Uses. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*. 3. 1-14. DOI:10.47709/ijmdsa.v3i4.4617.
13. Pat. 2771269, Russian Federation, A method for automatically diagnosing the condition of regenerative heat exchangers at low-temperature gas separation plants operated in the north of the Russian Federation. Efimov A.N. Patent Holder Gazprom Dobycha Yamburg Limited Liability Company, No. 2021107549, application no. 03.22.2021, published 04.29.2022.

14. Demin A.M., Naumenko A.P. Diagnostics of heat exchange equipment based on the operating parameters of a diesel fuel hydrotreating unit. *Omskiy nauchnyy vestnik*. No. 4. 2019. Pp. 85.
15. Internet resource: <https://dynamicsru.com/news/heat-exchanger-monitoring/>.
16. Patent No. 2808982, Russian Federation, A method for automatically diagnosing the presence of deposits on the walls of a regenerative heat exchanger. Averyanova A.A., V.B. Shnepp Scientific Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors, No. 2808982, publ. 05.12.2023.
17. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025693197, Russian Federation. Automatic System for Diagnosing the Technical Condition of a Recuperative Heat Exchanger: Application No. 14.11.2025, Publication No. 26.11.2025. Litvinenko A.A.; Copyright Holder: Joint Stock Company «V.B. Shnepp Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors».
18. A.A. Litvinenko, Y.V. Vankov and A.R. Timershin. «Theoretical Study of the Effects of Off-Design Conditions Induced by Deposits, Coolant Leaks, and Cross-Leaks on Heat Exchanger Performance». 2026 8th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2026. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE69046.2026.11481262.
19. GOST R 8.736-2011. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Direct Multiple Measurements. Methods for Processing Measurement Results. General Provisions. Introduced 2011-12-01. Moscow: Standartinform, 2011. 20 p.

**Сведения об авторах**  
**Принадлежность к организации**

**Литвиненко Анна Алексеевна**

аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, Россия

**Ваньков Юрий Витальевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, Россия

**Information about authors**  
**Affiliations**

**Litvinenko Anna Alekseevna**

Postgraduate student at the Department of Industrial Heat Power Engineering and Heating Systems at Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

**Vankov Yuriy Vitalyevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems at Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 24.08.2026 г.