

УДК 621.311.22

ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И НАЛАДКИ АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРОВ

ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В., канд. техн. наук, КОРОТКОВ А.А., НЕНАЕЗДНИКОВ А.Ю., инженеры

Приведено описание прикладного программного комплекса, обеспечивающего расчет параметров работы деаэратора атмосферного давления при известных конструктивных характеристиках струйных и барботажных устройств. Показана возможность и приведены примеры использования разработанного программного комплекса для проектирования, организации эксплуатационного контроля технического состояния и наладки атмосферных деаэраторов.

Ключевые слова: термический деаэратор, десорбция кислорода, десорбция диоксида углерода, программный комплекс, моделирование процессов деаэрации, струйный отсек, барботажное устройство.

APPLICATION SUITE FOR DESIGNING, ORGANIZATION FIELD INSPECTION AND SETTING UP ATMOSPHERIC DEAERATORS

G.V. LEDUHOVSKY, Candidates of Engineering, A.A. KOROTKOV, Engineer, A.J. NENAEZDNIKOV, Engineer

The description of application suite providing calculation of atmosphere pressure deaerator's operational characteristics with certain design characteristics of bubbling and stream equipment is shown. The possibility and examples of developed bundled software's usage for designing, organizing field inspection of technical condition and setting up of atmosphere pressure deaerators are shown.

Keywords: steam deaerator, oxygen desorption, carbon dioxide desorption, bundled software, deaeration process simulation, jet compartment, bubbler.

Особенности конструктивного исполнения деаэраторов различных моделей существенно влияют на их эксплуатационные характеристики. Поэтому в настоящее время технологически оптимальные режимы работы таких деаэраторов устанавливаются исключительно в ходе их натурных испытаний. Проведение последних сопряжено с существенными затратами времени, трудовых и энергетических ресурсов. В связи с этим разработка компьютерных моделей деаэраторов, описывающих протекающие в них технологические процессы с требуемой точностью и прецизионностью, является актуальной задачей.

Для разработки математической модели деаэратора в целом необходимы модели отдельных струйных и барботажных элементов, включенных в технологическую схему деаэратора. Количество таких отдельных элементов

в деаэраторах современных конструкций может достигать десяти, а схема их соединения по потокам воды и греющего пара должна предусматривать рециркуляцию, объединение и разделение потоков (рис. 1). Опубликован ряд альтернативных математических моделей струйных и барботажных элементов [1–3], применение которых при одних и тех же исходных данных приводит к существенно различающимся результатам. По этой причине использованию тех или иных моделей предшествует проверка их адекватности на основе результатов натурных испытаний деаэраторов различных конструкций. Для ряда элементов или диапазонов работы этих эле-

ментов опубликованные математические модели отсутствуют.

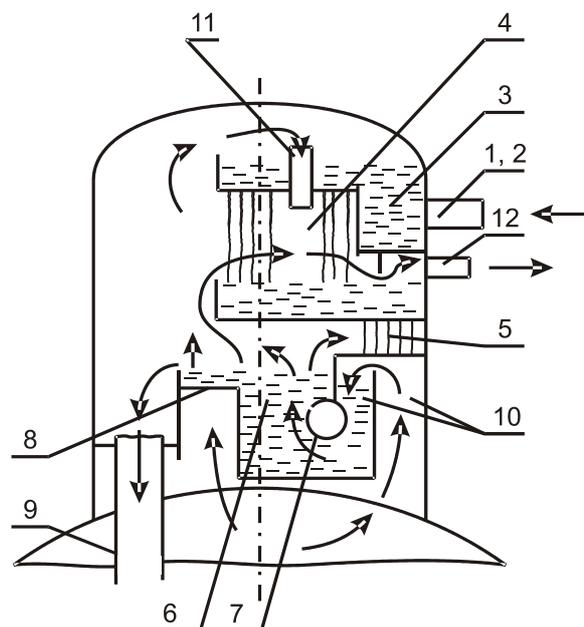


Рис. 1. Пример деаэрационной колонки деаэратора современной конструкции (ДА-300М): 1 и 2 – штуцеры подвода исходной воды; 3 – смесительный колодец; 4 – верхний струйный отсек; 5 – нижний струйный отсек; 6 – барботажный колодец; 7 – барботажный коллектор деаэрационной колонки; 8 – непровальный барботажный лист; 9 – опускные трубы; 10 – гидрозатвор барботажного колодца; 11 – пароперепускные трубы верхней тарелки; 12 – штуцер отвода пара; стрелками показаны направления движения пара

Нами предложены критериальные уравнения, обеспечивающие расчет процессов нагрева воды и десорбции из нее кислорода в струйных отсеках деаэраторов при струйно-капельном гидродинамическом режиме работы этих отсеков [4]:

$$\lg\left(\frac{t_H - t_1}{t_H - t_2}\right) = 0,0137 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,982} \text{Lap}^{0,163} \times \text{Fr}^{-0,054} \text{Pr}^{-0,832} \text{K}^{-0,290}, \quad (1)$$

$$\lg\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = 0,8910 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,964} \text{Lap}^{0,264} \text{Sc}^{-1} \text{K}^{-0,882}, \quad (2)$$

$$\text{где } \text{Lap} = \frac{\rho_{\text{ж}} W_{\text{п}}^2 d}{\sigma_{\text{ж}}}; \quad \text{Fr} = \frac{W_{\text{ж}}^2}{gd}; \quad \text{Pr} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}};$$

$$\text{K} = \frac{r}{c_{\text{ж}}(t_2 - t_1)}; \quad \text{Sc} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}};$$

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}} - W_{\text{п}}^{\text{вых}}}{2,3 \lg \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}}}{W_{\text{п}}^{\text{вых}}}} \quad \text{при } W_{\text{п}}^{\text{ex}}/W_{\text{п}}^{\text{вых}} \geq 1,7,$$

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}} + W_{\text{п}}^{\text{вых}}}{2} \quad \text{при } W_{\text{п}}^{\text{ex}}/W_{\text{п}}^{\text{вых}} < 1,7,$$

$$W_{\text{п}}^{\text{ex}} = \frac{D_{\text{п}}^{\text{ex}} \nu_{\text{п}}^{\text{ex}}}{\Omega_{\text{ex}}}, \quad W_{\text{п}}^{\text{вых}} = \frac{D_{\text{п}}^{\text{вых}} \nu_{\text{п}}^{\text{вых}}}{\Omega_{\text{вых}}},$$

$$W_{\text{ж}} = \frac{4G_{\text{ж}}^{\text{ex}}}{\pi d^2 n \rho_{\text{ж}}^{\text{ex}}}, \quad L = 3W_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}^{\text{ex}} d^3}{\sigma_{\text{ж}}}},$$

где t_1 и t_2 – температуры воды соответственно на входе и выходе струйного отсека, °С; t_H – температура насыщения пара в отсеке, °С; C_1 и C_2 – концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на входе и выходе струйного отсека, мкг/дм³ (проба при 25 °С); Lap, Fr, Pr, K и Sc – критерии соответственно Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта; H – высота отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки, м; d – диаметр отверстий струеобразующей тарелки, м; $\rho_{\text{ж}}$ – средняя плотность воды, кг/м³; $W_{\text{п}}$ – средняя скорость парового потока в отсеке, м/с; $\sigma_{\text{ж}}$ – средний коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м; $W_{\text{ж}}$ – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\nu_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с; $a_{\text{ж}}$ – коэффициент температуропроводности воды, м²/с; r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; $c_{\text{ж}}$ – истинная изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С); $D_{\text{ж}}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде, м²/с; $G_{\text{ж}}^{\text{ex}}$ – массовый расход воды на входе в отсек, кг/с; n – число отверстий струеобразующей тарелки, шт.; $W_{\text{п}}^{\text{ex}}$ и $W_{\text{п}}^{\text{вых}}$ – скорости парового потока соответственно во входном и

выходном сечениях отсека, м/с; $u_{\text{п}}^{\text{ex}}$ и $u_{\text{п}}^{\text{вых}}$ – удельные объемы пара соответственно во входном и выходном сечениях отсека, м³/кг; Ω_{ex} , $\Omega_{\text{вых}}$ – площади проходного сечения соответственно на входе и выходе пара из отсека, рассчитанные через высоту отсека H , за вычетом площади, занимаемой условными струями воды постоянного по высоте диаметра d , м²; L – средняя высота зоны чисто струйного режима течения воды в отсеке, м.

После тщательной проверки адекватности модели, аналогичные (1), (2), могут быть использованы для составления модели деаэратора в целом. В разработанном нами программном комплексе использован следующий подход. На первом этапе выполняется анализ конструктивной схемы деаэратора с выделением отдельных струйных и барботажных элементов, элементов потерь давления, объединения и разделения потоков. Цель состоит в составлении расчетной схемы деаэратора. Например, для деаэратора ДА-300м, конструктивная схема колонки которого показана на рис. 1, оборудованного барботажным устройством деаэраторного бака, расчетная схема включает 15 элементов (рис. 2).

Полученная таким образом расчетная схема вносится в программный комплекс в качестве исходных данных. Для этого необходимо указать тип каждого элемента (струйный кольцевой, струйный сегментный, барботажный лист, деление потока и т.п.), его конструктивные характеристики (по запросу) и задать направления движения потоков теплоносителей в виде матрицы коммутации.

По заданной расчетной схеме автоматически синтезируется математическая модель деаэратора в целом. Для этого используются процедура выбора алгоритма расчета того или иного элемента из базы и связи алгоритмов расчета отдельных элементов по входным и выходным параметрам потоков теплоносителей. В результате пользователю представляется экранная форма с полями для ввода значений параметров внешних потоков деаэратора (рис. 3). При этом имеется возможность просмотра всех результатов расчета по каждому элементу, а также ошибок, возникших в ходе расчета (рис. 4). Например, алгоритм расчета предусматривает контроль отсутствия перелива воды через борт струеобразующей тарелки, провала воды через отверстия барботажного листа, отсутствия выпара барботажного устройства, срабатывания гидрозатворов.

В настоящее время программа предусматривает выполнение только прямого расчета: по значениям параметров исходной воды, направляемой на деаэрацию, греющего пара (основного и барботажного) и давления выпара рассчитываются параметры деаэрированной воды на входе и выходе каждого отдельного элемента. При этом проектный расчет деаэратора проводится следующим образом: за-

дается конструктивная схема аппарата, после чего проверяется ее работоспособность и вычисляются характеристики эффективности технологического процесса.

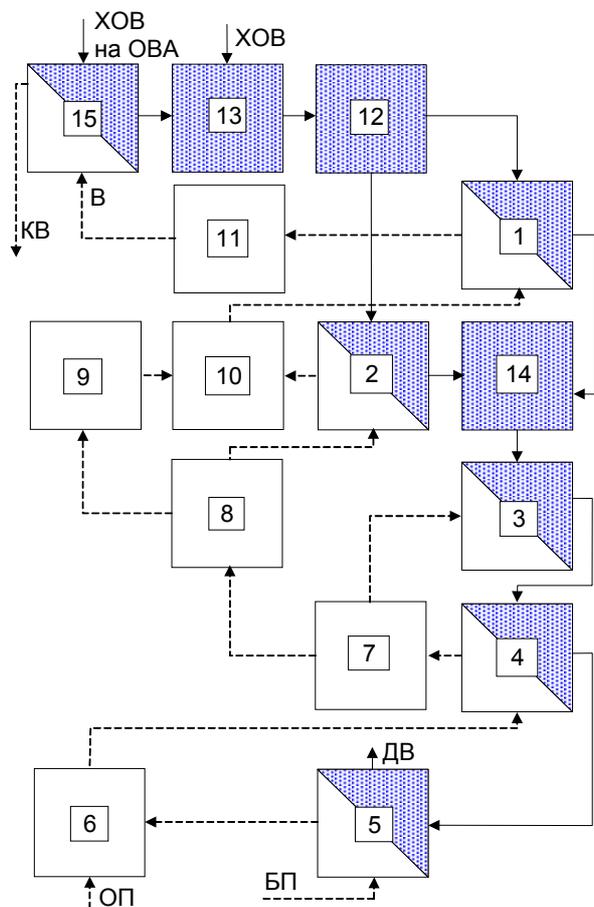


Рис. 2. Расчетная схема деаэратора ДА-300м: 1 и 2 – соответственно первая и вторая по ходу движения воды зоны верхнего струйного отсека; 3 – нижний струйный отсек; 4 – барботажный лист; 5 – объем воды в деаэраторном баке; 6 – надводное пространство деаэраторного бака; 7, 8 – элементы разделения парового потока; 9, 11 – элементы потерь давления пара; 10 – элемент смешения паровых потоков; 12 – элемент разделения потоков воды; 13, 14 – элементы смешения потоков воды; 15 – охладитель выпара деаэратора; ХОВ – основной поток химически очищенной воды, подаваемой в деаэратор; ХОВ на ОВА – поток воды на охладитель выпара деаэратора; В – выпар деаэратора; КВ – конденсат выпара деаэратора за охладителем выпара; ОП и БП – потоки основного и барботажного пара, подаваемого в деаэратор; ДВ – отвод деаэрированной воды; сплошные линии – направление движения потоков воды; пунктирные линии – направление движения потоков пара

Далее приведем примеры использования программного комплекса для целей организации эксплуатационного контроля за техническим состоянием деаэраторов и их режимно-наладочных испытаний.

Расчетная программа, разработанная для деаэратора ДСА-300 ст. № 1 деаэрационно-питательной установки теплосилового цеха ОАО «Северсталь», позволяет контролировать соответствие работы деаэратора характеристикам, полученным в ходе его режимно-наладочных испытаний. Стабилизировав режим работы деаэратора и измерив при двух-трех различных режимах необходимые теплофизические и химические характеристики потоков воды и пара, выполняется расчет значений параметров деаэрированной воды. Сравнение результатов расчета и результатов измерения позволяет оценить соответствие деаэратора его режимной характеристике. Их систематическое расхождение указывает на изменение условий работы деаэратора, связанное с возникновением дефектов внутренних элементов. В настоящее время, к сожалению, не удается диагностировать, какой именно из внутренних элементов поврежден.

Имеется и первый положительный опыт использования описанной программы: с ее помощью в порядке оперативного контроля установлено возникновение дефекта барботажного коллектора деаэраторного бака в виде разгерметизации одного из его фланцев. При этом выявлено систематическое превышение фактического значения остаточной концентрации растворенного в деаэрированной воде кислорода над расчетным значением этого показателя (в среднем более чем на 30 %). Уменьшение температуры исходной воды на входе в деаэратор с 73 до 49 °С подтвердило вывод о наличии дефекта: в баке возникали гидроудары, чего раньше при той же гидравлической нагрузке не наблюдалось.

Использование разработанного программного комплекса существенно сокращает объем режимно-наладочных испытаний. Целью испытаний является получение основной режимной характеристики деаэратора в графическом виде – зависимости остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде от температуры исходной воды и гидравлической нагрузки деаэратора. Такая характеристика строится при постоянных значениях удельного расхода выпара деаэратора, давления пара в колонке, удельного расхода пара на барботаж, уровня воды в деаэраторном баке и других параметров. Ясно, что основная режимная характеристика в таком виде не отражает реальной эффективности деаэратора, поскольку не учитывает изменчивость многих факторов. Получение поправок, учитывающих эту изменчивость, в ходе натурных испытаний деаэратора практически невозможно, поскольку требует проведения большого числа опытов.

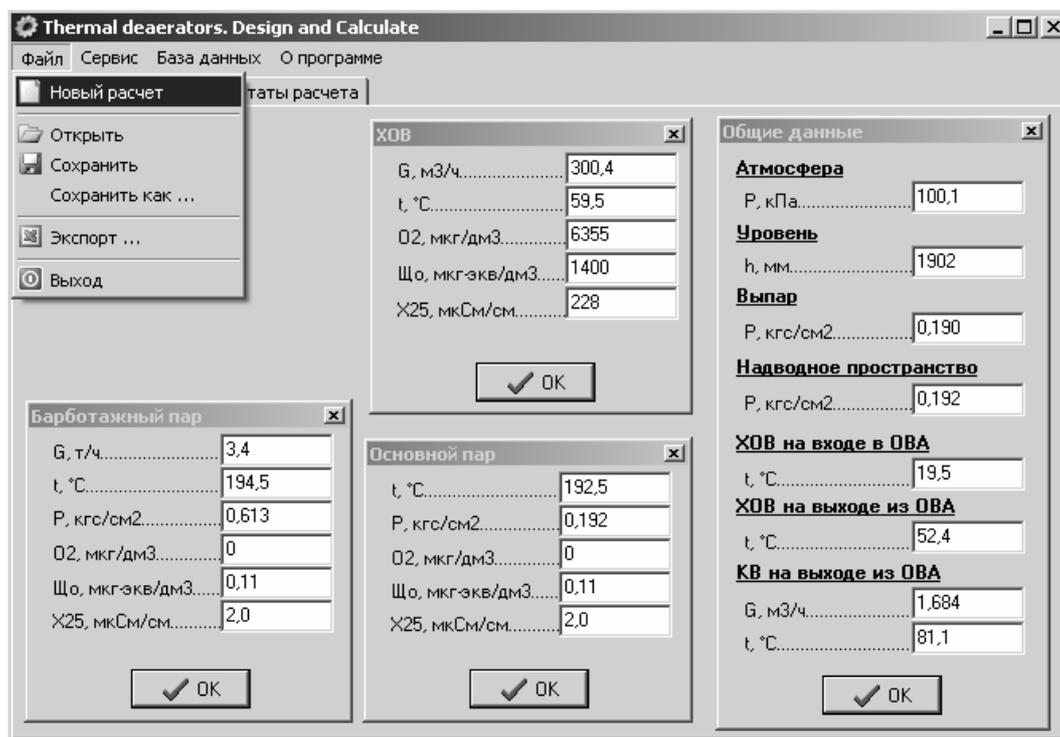


Рис. 3. Основная экранная форма программного комплекса для расчета атмосферных деаэраторов

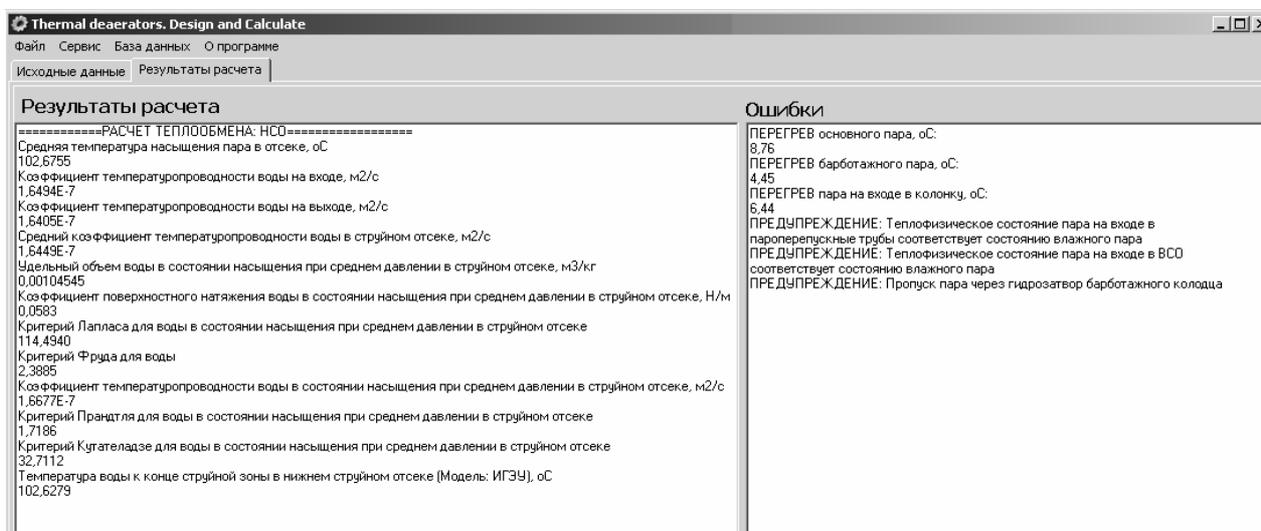


Рис. 4. Экранная форма, содержащая детальные результаты и ошибки расчета

Полный комплекс таких поправок может быть получен расчетным путем с использованием разработанного программного комплекса. Для этого необходимо провести испытания деаэратора при 9–10 режимах. В большинстве случаев этого достаточно, чтобы «настроить» программный комплекс под конкретный деаэратор. После этого все интересующие характеристики определяются расчетным путем. Завершающим этапом является проверка адекватности полученной основной режимной характеристики с комплексом поправок, для чего

проводятся дополнительные опыты при работе деаэратора в заранее выбранных режимах.

Заключение

Разработанный прикладной программный комплекс обеспечивает расчет параметров работы деаэратора атмосферного давления при известных конструктивных характеристиках струйных и барботажных устройств, заданных теплотехнических и химических параметрах качества теплоносителей.

Программный комплекс может быть использован при проектировании струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления для проверки работоспособности конструкции деаэратора и предварительного расчета показателей его эффективности.

Показана возможность использования разработанного программного комплекса для целей эксплуатационного контроля за техническим состоянием атмосферных деаэраторов: по систематическому отклонению расчетных показателей работы деаэратора от опытных значений возможно диагностирование внутренних дефектов деаэратора.

Использование программного комплекса позволяет существенно сократить объем натурных режимно-наладочных испытаний и по-

высить прогностические возможности основной режимной характеристики деаэратора.

Список литературы

1. **Оликер И.И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972.
2. **Оликер И.И.,** Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971.
3. **Шарапов В.И.,** Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.
4. **Ледуховский Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: Дис... канд. техн. наук. – Иваново, 2008.

Ледуховский Григорий Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
admin@tes.ispu.ru

Коротков Александр Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры тепловых электрических станций,
admin@tes.ispu.ru

Ненаездников Александр Юрьевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры тепловых электрических станций,
admin@tes.ispu.ru