

ОТЗЫВ

официального оппонента

Голованчикова Александра Борисовича

на диссертационную работу

Осипова Эдуарда Владиславовича «Сопряженное моделирование и совершенствование аппаратного оформления химико-технологических процессов, проводимых под вакуумом»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

На отзыв, как и положено, представлена сама диссертационная работа, содержащая 344 листа формата А4, и ее автореферат на листах того же формата. Тексты обоих материалов технически и грамотно отредактированы и сбалансированы с графиками, рисунками, схемами, таблицами и формулами. Материалы апробированы на полусотне научных конференций высокого ранга, опубликованы в двух десятках статей в журналах, индексируемых ВАК, и более десятка в журналах международных баз данных. Получено только одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Почему-то нет изобретений. Объем представленных работ традиционен для технических научных диссертаций. Несколько удивило в структуре изложения материала всего 4 главы. Я оппонировал около десятка докторских диссертаций. Обычно это от 6 до 9 глав.

Перехожу к квалификационным характеристикам материалов работы.

Актуальность автором доказывается достаточно убедительно. Объективно она подтверждается получением гранта. Но, по-моему, ее обоснование сужено вакуумной ректификацией и ее сопряжением с вакуум-насосами и другим оборудованием. А это процессы десорбции, экстракции, выщелачивания, сушки, выпарки, ионообмена и др. В аппаратном оформлении вакуумного оборудования существенные проблемы возникают с прочностью, смятием и плотностью швов, прокладок и герметичностью. В пользу автора можно сказать, что вакуумная ректификация приводится как основной пример, а сами блок-схемы могут быть адаптированы на любые вакуумные процессы и их аппаратное оформление.

Это видно из анализа литературных источников. В списке литературы их около 300. Сопряженные процессы и их оборудования, касаются вакуумных насосов и агрегатов, гидроприводов компрессорных вакуумных установок, пароструйных компрессоров и водоструйных насосов, парожеткторных насосов и теплообменных вакуум-конденсаторов, химических вакуумных процессов, связанных с производством гликолей, экологических процессов переработки отходов в вакууме, общих вопросов вакуумной техники и методов ее расчета, в том числе современных программных средств, каталогов современного вакуумного оборудования, докторских и кандидатских диссертаций, автоматизации и управления

объектами, также связанными с вакуумированием. Но пласт вакуум-массообменных процессов почему-то почти не затронут (кроме ректификации и выпаривания). Здесь надо отметить, что более 1/3 всех проанализированных источников – зарубежные.

Современны источники информации, то есть изданные в ХХIвеке, их почти 2/3.

В первой главе, традиционно посвященной литературному обзору (30 листов машинописного текста), описаны как типовые технические установки, так и современные вакуумосоздающие системы – отечественные и зарубежные. Из 8 заявленных задач исследования здесь автор решает две, связанные с комплексным анализом вакуум-процессов и их аппаратурным оформлением, а также определением основных параметров с их оптимизацией и управлением.

Чувствуется глубокая и качественная проработка источников информации, подкрепленная рисунками технологических и структурных схем (рис.1.1-1.7) разных производств: ректификации, химических веществ, экологических процессов выпаривания. Второй раздел этой главы посвящен описанию сопряженных процессов и оборудования, в частности, различного типа насосов и их комбинаций, как отечественных, так и зарубежных. Здесь также описание принципов их работы сопровождается рисунками (рис. 1.8,1.9, 1.14-1.17,1.19,1.20). Кроме насосов в сопряженные системы входят конденсаторы, барометрические трубы, газопаросепараторы, теплообменное оборудование и соединительные трубопроводы (рис.1.10 - 1.12) с технологическими схемами этих комбинаций (рис.1.18 и 1.21). Схемы и рисунки сопровождаются графиками зависимостей доли конденсации паров от давления и температуры (рис.1.22) и допустимого давления сжатия (рис. 1.23).

Два первых вывода по первой главе я бы не стал записывать – это общие фразы. Остальные 5 вполне уместны и соответствуют основным задачам исследований. Это определение основных критериев, оказывающих основное влияние на ВСС, соединения их в единую систему, выбор критериев оценки функционирования и ее эффективности с использованием методов физического, математического и компьютерного моделирования.

Во второй главе, связанной с методологией исследований, направленных на эффективное функционирование вакуумных блоков, большое внимание уделено физическому и математическому моделированию вакуумных систем, соединяющих между собой различные процессы и аппараты. Автор отмечает особенность этих вакуумных процессов: функционирование под вакуумом существенно изменяет свойства парогазожидкостных смесей (давление, температура, объемы, агрегатные состояния фаз). Потому типовые формулы, описывающие состояние таких многофазных систем на границах насыщения, не соответствуют реалиям (стр. 44). Такие фазовые переходы существенно затрудняют описание реальных физических процессов (кстати, это касается не только процессов,

происходящих под вакуумом, но и процессов, связанных со скачками избыточного давления (например, дефлегматоров, конденсирующих пар на выходе из ректификационной колонны). Особенно задача усложняется при ректификации не двух, а многокомпонентных систем (стр.45). Здесь надо учитывать вариативность параметров системы как в объеме объекта, так и во времени, граничные условия и ограничения, связанные с эксплуатацией как отдельных звеньев, так и их совместной работы (сопряженное моделирование).

Я оппонировал за 40 лет около десятка докторских и более 20 кандидатских диссертаций, писал отзывы на 50 таких научных работ, но с такой сложной многофункциональной работой, связанной с процессами и оборудованием вакуумных процессов, встретился впервые. В основном это были вакуум-процессы десорбции и выпаривания растворов под вакуумом. Но сама идея сопряжения, то есть совокупности процессов и аппаратов, мне встречается впервые. Система не сводится к простой совокупности элементов, (стр.50, рис.2.1). Автор создает систему функциональных аппаратов (формулы 2.10-2.15) с их связями входных и выходных параметров и коэффициентами, описывающими физико-химические процессы. Сопряжение здесь опирается на то, что выходные параметры предыдущего блока являются входными параметрами последующего (стр.52).

Далее предлагаются алгоритмы расчетов, или по терминологии автора подзадачи для проектирования (стр.53-54).

В качестве примера приведена декомпозиция системы, работающей под вакуумом с учетом подвода энергии(рис.2.2) с идеей рециркуляции (байпаса).

Далее показана и описана декомпозиция ВСС, состоящая из трех блоков (рис.2.3). Особый упор сделан на точках сопряжения (формулы (2.15)-(2.23)), (тоже (2.24)-(2.25) и n-блоков, рис.2.4). Задачи синтеза и декомпозиций настолько сложны, что для их решения требуются сильные программные комплексы типа ChemCad5.1 и Aspenplus.

Описана процедура компьютерного моделирования. Пошагово ее соискатель разбил на 5 пунктов: от анализа техпроцесса и составления компьютерной модели, анализа результатов и проверки адекватности, варьирования управляемых параметров и их оптимизации с разработкой системы АСУ (стр.60). Важно отметить, что предлагаемую систему моделирования можно применять не только при создании новых техпроцессов, но и реконструкции действующих с ее использованием на стадиях АСНИ, САПР и АСУ (рис. 2.7-2.14).

Наглядная демонстрация сопряженных трех вакуумных процессов представлена на графиках рис. 2.15(характеристики вакуумирования самого объекта и вакуумного конденсатора позволяют определить массив входных параметров объекта последующего). Еще более усложняется графическая модель сопряжения с учетом гидравлического сопротивления (рис.2.16). Для несколькихсопряженных элементов аналогическая картина представлена на

номограмме (рис. 2.17). Если убрать допущения об изотермичности процесса конденсации вакуумного блока и ВВС, то сопряжение элементов системы может быть представлено рис. 2.12, позволяющем выбрать оптимальные параметры (в частности температуру охлаждающей воды в зависимости от термического сопротивления поверхностей теплообмена и температуры на входе, рис.2.18). Я останавливаюсь подробно на этих графиках, так как, на мой взгляд, они являются одной из «изюминок» всей диссертации.

Раньше такие эффекты сопряжения на стадии проектирования без программ ЭВМ не учитывались, а операторы на производстве с учетом опыта эксплуатации каждого промышленного объекта подбирали параметры эмпирически без сопряжения друг с другом.

Блок схема сопряжения промышленных установок смоделирована на рис.2.19 (здесь я не понял выход на элемент 2).

Подробное описание более сложной ВСС представлено на рис.2.20.

Интересен в связи с этим раздел, оценивающий эффективность функционирования вакуумных блоков (раздел 2.4) с выбором критерия оптимальности.

Только компьютерное моделирование позволяет на основе системного подхода решать поставленные задачи. Поэтому автор использует программные комплексы UnisimR 451 с опорой на способ декомпозиции сложных физических процессов связи давления, температуры, объемов газовой, паровой и жидкой фаз, соединяя их граничные условия на входе и выходе.

Здесь приходится дополнительно использовать специальные программные комплексы «UnisimDesign», AspenHYSYS, ChemCad и собственную программу, зарегистрированную в отечественной базе.

Автор объясняет преимущества и недостатки каждого такого комплекса на стадиях обработки научных данных, проектирования и управления и записывает качественный алгоритм последовательности расчетных операций (стр.104 и 105). Можно поспорить с автором о границе адекватности в 15%. Есть же точное определение адекватности и ее расчетов в регрессионном анализе при сравнении с табличным значением критерия Фишера. Поэтому в авторском исполнении эти 15% расхождения надо обозначать другим термином.

Приводятся примеры расчетов сопрягаемых процессов: однократного испарения (формулы 3.1-3.9) со схемами процесса и конденсационного блока (рис.3.2); вакуумного конденсатора (рис.3.3-3.4) с формулами алгоритма (3.10-3.26), включающими массообмен, теплопередачу и гидравлическое сопротивление, а на рис.3.5 приведена блок-схема расчета вакуумного конденсатора. Приводится также сравнение с типовым расчетом, не связанным с сопротивлением смежных процессов и их аппаратным оформлением, и даются рекомендации по температуре оборотной воды и давления (стр.117).

Аналогичные алгоритм, схемы и результаты сравнительных расчетов представлены в разделе 3.5 для насоса ЖКВН, показаны особенности этих вакуумных насосов, на работу которых не влияет конденсация части паровой фазы и влажность воздуха. Интересна сама модель структуры потоков в объектах идеального смешения с объемами в каждой, ограниченными соседними лопатками (стр.120 и рис.3.6-3.8 с формулами (3.27 ÷ 3.40)).

Реализация алгоритма расчетов ЖКВН представлена в программном комплексе «UnisimDesign 451», а декомпозиция элементарных под процессов на рис 3.9, разбитых на 9 модулей (рис.3.10) и объединенных в ячейки (I÷IV). Отдельно показаны расчетная схема идентификации этих параметров (таблица 3.1) и графики рабочих линий (рис.3.12-3.15). Выбрано аппроксимирующее уравнение с 6-ю коэффициентами, подтверждающее высокую корреляционную связь входных и выходных параметров ($R^2=0,997$, таблица 3.2). Проведен пересчет рабочих характеристик на схемы, представленные на рис.3.15 и 3.16, и влияние давления и температуры на производительность (графики на рис.3.17).

Важно, что поправки, рассчитанные по уравнению регрессии, позволяют (в отличие от стандартов для вакуумных насосов) определять производительность при давлениях меньших, чем 33 мбар сухого воздуха (формулы (3.42)-(3.47), графики на рис.3.3 и 3.4).

Хорошо описана в разделе 3.5.3 экспериментальная установка (рис. 3.39 и 3.40) по исследованию работы ЖКВН с современными приборами, обеспечивающими высокий класс точности и соответственно малую погрешность в измерениях температуры, давления или вакуума и расхода (таблица 3.7). Говорится о сложности проведения параллельных опытов, связанных с изменением температуры на входе. В таблице 3.8 представлены результаты 4-х параллельных опытов. Воспроизводимость определялась по критерию Романовского, подтверждающего отсутствие грубых погрешностей относительно средних значений по температуре, давлению и расходу (рис.3.41 и 3.42). Приведена сводная таблица 3.9 по всем входным и выходным параметрам в параллельных опытах в сравнении с расчетными значениями (их желательно было привести еще в одном последнем столбце). Такое сравнение наглядно продемонстрировано на графиках 3.43 и 3.44, но нельзя здесь говорить, что совпадение хорошее: 15% по производительности – это удовлетворительное совпадение. По температуре имеет место систематическая ошибка, так как теоретическая кривая (пунктирная линия) идет ниже экспериментальных линий (линии 1 и 2). Что-то здесь неладно с подстрочными коэффициентами $t=t(p)$ и их было несложно скорректировать.

Аналогичные математические модели и их анализ проведены соискателем для вакуумного насоса типа Рутс (раздел 3.6), парового эжектора (раздел 3.7), проведено их сравнение при совмещении с работой ректификационных колонн (рис.3.50-3.53). Убедительно представлены

выводы, но и здесь хотелось бы в выводах увидеть не только качественные результаты, но и численные параметры.

Материалы, представленные в III-ей главе весьма интересные и емкие (75 листов). Ее можно было бы, как и II главу разбить на две и разделы 3.5.3-3.5.8 перенести в эту новую главу.

Количественный и качественный анализ сопряжения вакуумных модулей как комплекса физических, химико-технологических процессов с их математическим моделированием и возможностями совершенствования и управления проведен в IV главе диссертации. Важно то, что показаны не только возможности совершенствования и управления, но и реализация в промышленных установках этих возможностей. Декомпозиционные процессы по отдельным модулям здесь объединяются концентрациями компонентов в паровой, газовой и жидкой фазах, вакуумом, потерями давлений при переходах и граничными условиями. Например, в разделе 4.1 рассмотрены вышеназванные технологические процессы сопряженного моделирования блока ректификационных колонн производства этаноламинов с вакуумо-создающимися модулями.

Здесь и структурная схема (рис.4.1), и расчетная схема (рис.4.2 и 4.3), таблицы технологических параметров каждой колонны (таблицы 4.2 и 4.4), концентрации компонентов для ввода исходных и справочных данных, и другие параметры для компьютерных расчетов. Приведены наглядные графики результатов расчетов как функций температур и расходов (рис.4.4). Предложены две схемы реконструкции вакуум создающих систем (рис.4.5 и 4.6), приводятся аргументы для такой модернизации (стр.186-197) с расчетными моделями, листингом программы (рис.4.9), таблицами результатов расчетов и графиками с рабочими точками (рис.4.9.1 и 4.9.2). Сделан весьма впечатляющий анализ: емкий, подробный и убедительный.

Такой же емкий анализ проведен в разделе 4.2. для сопряженного моделирования вакуумного модуля с мини-НПЗ производительностью до 1 млн. тонн в год (тип ЭЛОУ –АВТ), обеспечивающей получение и моторного топлива, и сырьевых компонентов нефтехимии (рис.4.10-4.13). Логика представленных материалов повторяет описанные процессы в разделе 4.1. Достаточно сказать, что этот раздел содержит 16 таблиц, 9 рисунков со схемами и графиками.

Сопряжение характеристик вакуумного блока и ВСС (стр.223) почему-то не обозначено отдельным подпунктом. Непонятно, это продолжение раздела 4.2 для линии-НПЗ или самостоятельный подраздел, общий для 4.1 и 4.2. Здесь также показаны точки сопряжения на рабочей характеристике ЖКВН (рис.4.23) и ряд графиков зависимости остаточного давления паров в колонне и в ЖКВН и температура конденсации в модулях в зависимости от рабочих температур. Предложен специальный вакуум-конденсатор (рис.4.28 и 4.29). Правда, снижая потери давления, одновременно снижается и коэффициент теплопередачи, что требует увеличения длины теплообменных трубок (стр.229). Сравнение

технологических и расчетных параметров различных типов насосов приведено в таблицах 4.27 и 4.29.

Еще один вариант сопряженного моделирования рассмотрен в разделе 4.3.

Здесь решаются, помимо технологических, экономические проблемы переработки отходов при ректификации с использованием ВСС.

В таком же ключе рассмотрены технические аспекты сопряженного расчета парожекционной ВСС для установки гидрокрекинга и вакуумной ректификации мазутаи ВСС. Все 5 сопряженных вакуум-технологий и производственных действующих промышленных объектов имеют несомненную новизну и практическую ценность, как на стадии САПР, так и на стадии АСУ, что отражено в пяти выводах по четвертой главе. Здесь можно было для убедительности не просто констатировать качественные преимущества рекомендуемых ВСС, но и подкрепить их численными параметрами. Они наглядно продемонстрированы в сводных таблицах технико-экономических показателей (правда первый вывод выглядит как аннотация). Практическая ценность результатов подкрепляется актами внедрения и использования результатов с экономическим эффектом более 3,2 млн. рублей за счет снижения эксплуатационных затрат более чем в 4 раза, уменьшения давления в 1,5 раза и снижения расходов энергоносителей и оборотной воды. Это серьезные достижения вполне соответствуют рангу докторской диссертации. Результаты и выводы по всем четырем главам обобщены в заключении. Их, как и выводы целесообразно было бы также усилить численными параметрами.

Вопросы, замечания и пожелания:

Актуальность шире, чем представлена автором. Она не ограничивается ректификацией под вакуумом, которой уделено в работе основное внимание. В этом смысле у работы большие перспективы на будущее.

1. Что нового в программах Unisim, AspenHYSYSV12? Вы их как-то модернизировали на вакуум-процессы и аппараты? В чем отличие и преимущества Вашей программы для ЭВМ?
2. Что нового в конструкции насоса ЖКВН (стр.14в автореферате)? Что характеризует максимум на графике характеристики этого насоса (рис. 14,15 и 16 на стр.16-17 автореферата)?
3. Почему такие большие отклонения по расчетам производительности – от 18 до 33% (стр.20)? Это честно, но надо объяснить. На рис.19 теоретическая кривая 3 ниже экспериментальных данных. Чем объяснить эту систематическую ошибку? Что неучтено в теории по сравнению с экспериментом? Поэтому нельзя говорить, что теория хорошо согласуется с экспериментом. Удовлетворительно – это «Да».

4. Нет корреляционного анализа, оценивающего воспроизводимость экспериментальных и лабораторных данных с теорией, проверки адекватности математических моделей, значимости коэффициентов.
5. Судя по библиографическому списку, в котором проанализировано, более 100 зарубежных публикаций из 300 общего списка, на Ваш взгляд, российские вакуумные технологии и оборудование, научные и проектные результаты отстают от мирового уровня? Есть ли тут проблемы с импортозамещением, в том числе в цифровизации и программном обеспечении?
6. В конце обозначения цели работы я бы добавил слова и «...на основе сопряженного моделирования». Это была бы хорошая связка с названием диссертации.
7. На рис.2.2 показан поток рециркуляции (частично обратный поток как после дефлегматоров флегма с изменением агрегатного состояния). Но почему рецикл 11 назван байпасным потоком – ведь так обозначается прямой поток в обход аппарата.
8. В третьей главе не записаны сами уравнения. Это полиномы $(n-1)$ степени, где n -число коэффициентов?
9. Не рассмотрены пусковые периоды, их особенности при сопряженной работе вакуумных блоков. Здесь нестационарность может вызвать свои проблемы.
10. Есть ли принципиальные особенности сопряжения модулей блока ректификационных процессов, описанных в разделе 4.1, и мини-НПЗ, описанной в разделе 4.2? Тоже для последующих разделов этой главы
11. Говоря об адекватности расчетной модели, рассчитанной на компьютерной реальной технологической модели (стр.222), математически корреляционным анализом (критерий Фишера) она соискателем не доказывается. Лучшее сказать о хорошей точности моделирования, без применения термина «адекватность».
12. Почему автор считает, что опорой сопряженного расчета всех элементов вакуумной системы является остаточное давление (стр.81), а не суммарные затраты на эксплуатацию?
13. Есть редакционные стилистические ошибки: после формулы (2.18) на стр. 94, записана формула (2.44); на рис.3.20-3.28 не указаны размерности по осям абсцисс и ординат. Только читая описание этих графиков можно понять размерности.

У сопряженного моделирования ВСС действующих и проектируемых промышленных установок больше перспективы для всех технологических процессов, использующих вакуум: сушка, выпаривание, адсорбция и абсорбция, и идеи, реализованные в диссертации Осипова Э.В. могут быть успешно адаптированы к этим технологиям.

Диссертационная работа является завершенным научно-квалификационным исследованием и выполнена на высоком уровне. Разработана комплексная методология сопряженного моделирования

вакуумных блоков с учетом взаимного влияния характеристик элементов системы, а также введены критерии оценки эффективности работы ВСС, что можно квалифицировать как решение научной проблемы, связанной с значительным повышением эффективности процессов в вакуумных аппаратах, имеющей важное научное, экономическое и экологическое значение, внедрение результатов которых вносит значительный вклад в развитие страны. По уровню актуальности, достигнутой цели исследований и решенных технических и технологических задач, научной новизны, связанной с физическим, математическим и компьютерным моделированием аэро-и гидродинамических, тепломассообменных вакуумных процессов и их сопряжением, большой практической ценности, связанной с внедрением результатов на промышленных предприятиях, в проектных организациях и вузах, количеством весомых публикаций и апробации в журналах и конференциях высокого ранга, работа Осипова Эдуарда Владиславовича соответствует требованиям постановления Правительства РФ от 24.09.2013г. №842 п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых ВАК РФ, и он заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13.Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент

Профессор кафедры "Процессы и аппараты химических и пищевых производств" Волгоградского государственного технического университета, профессор, доктор технических наук, научная специальность 05.17.08. Процессы и аппараты химических технологий.

 Голованчиков Александр Борисович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», 400005, Российская Федерация, Волгоградская область, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28.

Тел: 8(8442) 24-84-40

e-mail: pahp@vstu.ru

