

Современные выпарные установки: потенциал и проблемы

В.Н. Филоненко – *Институт проблем энергетики в пищевой промышленности НУПТ (Украина, Киев)*

В.И. Михайлов – *ЗАО «Тамбовская сахарная компания (Россия, Москва)*

А.П. Ветров – *«Сахпроект», (Россия, Курск)*

Считаем актуальным вынести на обсуждение ряд проблем, связанных с созданием современных выпарных установок (ВУ), понимание которых будет способствовать их экономически обоснованному проектированию и внедрению.

К современным экономичным ВУ мы относим такие, которые обладают высоким испарительным потенциалом, так называемым, коэффициентом эффективности выпаривания – $K_{ВУ}$, т выпаренной воды/т греющего пара, численное значение которого не ниже 4,15 – 4,36.

Такие ВУ способны за счет только системы парootборов без использования механической или паровой компрессии вторичных паров обеспечить получение густого (70 – 74 % СВ) сиропа при условии полномасштабного использования в тепловой схеме сахарного завода вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Проблема выбора между V- и VI- корпусными ВУ. Переход к VI-корпусным ВУ продиктован так называемым «теплотехническим скачком» в модернизации тепловых схем сахарных заводов, суть которого – в возрастании степени внедрения ВЭР от нулевого уровня в 60-е годы до полномасштабного в последние годы.

Объем ВЭР, внедренных в современную экономичную тепловую схему завода эквивалентен 17,7 – 19,6 % к массе свеклы снижению расхода греющего пара на завод в системы нагрева сокового потока теплоты, за счет теплоты, в % к массе свеклы:

- самоиспарения конденсата греющего пара 1,5 – 1,7
- самоиспарения конденсатов последних корпусов 2,9 – 3,1
- утфельного пара 4,8 – 5,7

и за счет использования в качестве питательной воды для диффузионной установки, в % к массе свеклы:

- жомпрессовой воды 3,6 – 4,0
- конденсата 4,9 – 5,1

При низкой (нулевой) степени внедрения ВЭР сумма парootборов ВУ ($\sum e^{(i)}_{ВУ}$) составляла значительную величину – 50 – 60 % к массе свеклы и даже низких (2,14 – 2,45) значений $K_{ВУ}$, характерных для IV- и V-корпусных ВУ было достаточно для достижения высоких, регламентных на то время, 65–68 % СВ концентраций сиропа. Потребности в высокоэффективной ВУ с $K_{ВУ} > 2,45$ не возникало.

При полномасштабном внедрения ВЭР величина $\sum e^{(i)}_{ВУ}$ существенно уменьшается до уровня 21,8...28,0 % мсв, снижая до такого же уровня расход греющего пара на ВУ – $D_{гр.ВУ}$.

Достижение современного регламентного сгущения сиропа (70...72 % СВ) в условиях минимизации расхода греющего пара от ВУ в соответствии с балансовым соотношением (1) возможно только за счет повышения $K_{ВУ}$ до уровня 3,90–4,45.

$$СВ_{сир} = СВ_{сок} / (1 - K_{ВУ} \cdot D_{гр. ВУ} / G_{сок}), \quad \% СВ, \quad (1)$$

где $СВ_{сир}$ – концентрация сиропа из ВУ, % СВ;

$СВ_{сок}$ – концентрация сока на входе в ВУ, % СВ;

$D_{гр. ВУ}$ – расход греющего пара на ВУ, % к массе свеклы;

$G_{сок}$ – расход сока на входе в ВУ, % к массе свеклы.

Самыми приемлемыми в экономическом и техническом планах способами повышения $K_{ВУ}$ являются два равноценных в теплотехническом отношении технических решения: первое – это увеличение числа корпусов ВУ, второе – это «смещение» парootборов ВУ в направлении последних корпусов.

Простейшим, в техническом плане, решением при полномасштабном внедрении ВЭР и без существенной модернизации системы парootборов явилось увеличение с 5- до 6- ступеней выпаривания на ВУ.

Вывод о целесообразности проектирования VI- корпусных или V- корпусных со смещением парootборов решается в настоящее время исходя из соотношения приоритетных для заказчиков экономических или эксплуатационных факторов.

Современные проектные расчеты свидетельствуют, что VI- корпусная ВУ равноценная в тепловом отношении V- корпусной имеет на 14 % большую поверность теплообмена.

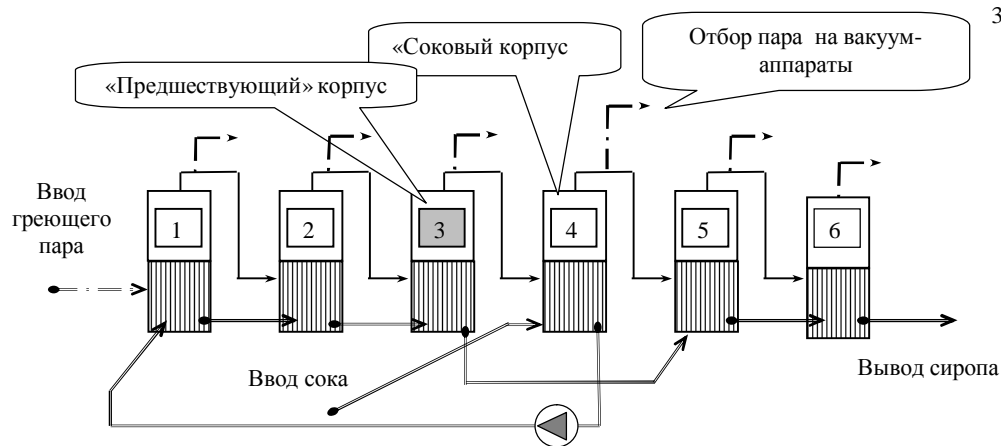
Следует обратить внимание на важную эксплуатационную особенность системы парootборов в современных ВУ, которая состоит в существенном увеличении (до 50 – 55 %), против существовавшей ранее (28 - 35 %) доли парootбора на вакуум-аппараты.

В такой ВУ кратковременное уменьшение расхода сока на ВУ (например, при неритмичной работе завода) приводит к относительному увеличению паровой нагрузки ВУ, вследствие достаточно длительной неизменности расхода пара на вакуум-аппараты.

Т.е. при эксплуатации экономичной ВУ неритмичная работа завода создает реальную угрозу пересгущения сока на «сиропных» корпусах.

Проблема входа исходного сока в ВУ. В современных экономичных V-, VI- корпусных ВУ получил распространение ввод сока не в 1-й корпус ВУ, т.е. стандартный ввод сока, а в корпус, который несет паровую нагрузку вакуум-аппаратов, так называемый ввод сока «в рассечку» ВУ.

На рисунке приведена принципиальная схема современной VI-корпусной ВУ с подачей сока «в рассечку», в IV корпус, который несет паровую нагрузку вакуум-аппаратов.



Принципиальная схема паро-соковых потоков в VI-корпусной ВУ с подачей исходного сока в IV корпус.

Факторами, определяющими номера корпуса, в который следует подать сок в ВУ являются:

- полнота использования ВЭР в тепловой схеме завода;
- номер корпуса, перенос на который самого большого пароотбора (на вакуум-аппараты) балансово необходим для повышения $K_{ВУ}$.

Если теплота ВЭР используется полно и пароотборов из корпусов ВУ мало, то только «размещение» паровой нагрузки вакуум-аппаратов на IV- или V-корпусе, обеспечит регламентное сгущения сиропа.

Если теплота ВЭР используется не достаточно полно и пароотборов много, то регламентное сгущение сиропа обеспечивает «размещение» паровой нагрузки вакуум-аппаратов на II- или III- корпусе.

Ввод сока в корпус, который несет нагрузку вакуум-аппаратов, и обеспечивает существенное (до 4...5 °С) снижение его Δt_0 , явился удачным техническим решением, позволяющим значительно, несмотря на некоторое повышение Δt_0 в головных корпусах ВУ, снизить температурную напряженность ВУ.

В качестве еще одного положительного теплотехнического эффекта от ввода сока «в рассечку» можно отметить небольшое ($\approx 0,90\%$ к массе свеклы) снижение расхода пара на ВУ за счет снижения расхода пара на подогреватели сока перед I-м корпусом ВУ.

Проблема «предшествующего» корпуса. Ввод сока «в рассечку» ВУ, решив проблему температурной напряженности ВУ, породил проблему эксплуатации «предшествующего» корпуса, с которой встретились все сахарные заводы, получившие в результате реконструкции такие ВУ.

Суть этой проблемы – высокие (9,0...12,4 °С) значения востребованного располагаемого температурного напора эти корпусом – $\Delta t_0^{\text{предш}}$, имеющие тенденцию к повышению при снижении производительности завода по свекле относительно расчетного уровня. В табл. 1, приведены эксплуатационные и проектные значе-

ния $\Delta t_0^{\text{предш}}$ для ВУ ряда сахарных заводов, оснащенных трубчатыми выпарными аппаратами пленочного типа.

Таблица 1. Значения $\Delta t_0^{\text{предш}}$ «предшествующих» корпусов в системе VI-корпусных ВУ реальных и проектируемых сахарных заводов.

Завод, Фирма-проектировщик	№ корпуса		«Востребованный» располагаемый температурный напор «предшествующего» корпуса, $\Delta t_0^{\text{предш}}$, °С	Концентрация сока на выходе из «предшествующего» корпуса, % СВ.
	предшествующего»	«сокового»		
«У-ский», Россия (Wiedemann)	3	4	12,1	62,8 %
«Н-ский», Австрия (ВМА)	3	4	9,2	69,0 %
«Р-ский», Россия (IPRO)	4	5	9,2	65,2 %
«Т-ский», Россия (IPRO)	4	5	9,4	70,3 %
«М-ский», Россия (GEA)	3	4	11,9	64,5
«М-ский», Россия (ТСК)	3	4	9,4	63,2 %

Примечание : Названия реальных сахарных заводов приведены в условной записи.

По нашему мнению, эта проблема порождена сочетанием в корпусе двух негативных для теплопередачи обстоятельств:

- высокой (63...70 % СВ) концентрации сгущенного сиропа на выходе из корпуса;
- высокой тепловой нагрузкой корпуса.

Узлы подвода, отвода и рециркуляции сока осуществлены таким образом, что при уменьшении производительности завода по свекле система автоматики, удерживая уровень сока в подтрубном пространстве, уменьшает его выход сока из аппарата, увеличивая, тем самым, перелив сгущенного сока из приемной лейки в подтрубное пространство аппарата. СВ сока во входном патрубке циркуляционного насоса и в надтрубном пространстве аппарата существенно повышается.

Соответственно, СВ сока на выходе из трубного пучка повышается до 77 – 85 %, что приближает к «карамелизации» нижнюю часть поверхности теплообмена.

Коэффициент теплопередачи в корпусе снижается, располагаемый температурный напор, востребованный корпусом растет до 16...17 °С.

Эксплуатационными рекомендациями предотвращения «карамелизации» поверхности теплообмена «предшествующего» корпуса являются:

1. Не допускать снижения расхода сока на входе в корпус, т.е. производительности завода по свекле.

2. Не допускать потерю перелива сгущенного сока из приемной лейки в подрубное пространство корпуса и уменьшения производительности циркуляционного насоса.

3. Автоматизированно добавлять конденсат в надрубное пространство аппарата.

Если пренебречь указанными обстоятельствами, то это неминуемо приведет к снижению производительности завода. ВУ станет «узким местом» по температурному режиму.

Увеличение поверхности теплообмена «предшествующего» корпуса не приводит к снижению востребованного температурного напора.

Если в циркуляционных аппаратах «препятствием» снижению температурного напора является снижение плотности теплового потока, то в пленочных – это увеличение рециркуляционного потока в соответствии с режимом работы распределительного устройства, которое приводит к:

• повышению СВ пленки **выпариваемого** раствора;

• повышению физико-химической температурной депрессии

• к увеличению толщины пленки выпариваемого раствора;

В результате – $\Delta t_0^{\text{предш}}$ снижается незначительно, что практически нивелирует повышение поверхности теплообмена корпуса.

Даже значительное (на 70 %) повышение поверхности «предшествующего» корпуса (от 4720 м² до 8000 м²) приводит к незначительному (на 13 %) снижению располагаемого температурного напора на корпус, (табл. 2).

Таблица 2. Моделирование влияния увеличения поверхности теплообмена «предшествующего» корпуса ВУ на востребованный им располагаемый температурный напор.

Поверхность «предшествующего» корпуса, м ²	Коэффициент теплопередачи, $K_{\text{полезь}}$, Вт/м ² ·К	Располагаемый температурный напор, Δt_0 , °С
4720	967	14,2
6000	912	13,9
8000	887	12,3

Решение проблемы состоит исключительно в поддержании номинального технологического регламента эксплуатации корпуса по соковому потоку.

Проблема определения поверхности ВУ. Проектно-эксплуатационная статистика удельной поверхности теплообмена корпусов V- корпусных ВУ сахарных заводов СНГ, оснащенных циркуляционными выпарными аппаратами ($\sum f_{\text{ВУ}}$) составляет 2,80 – 3,10 м² на 1 т переработанной свеклы в сутки.

В качестве современной рекомендации для проектирования VI- корпусных ВУ на базе трубчатых выпарных аппаратов пленочного типа можно предложить значение $\sum f_{\text{ВУ}} = 2,75 - 2,90$ м² на 1 т переработанной свеклы в сутки, в частности по корпусам: для I корпуса – 0,50 – 0,56, для II– 0,50 – 0,56, для III– 0,50 – 0,60, для IV– 0,50 – 0,60, для V– 0,30 – 0,50, для VI– 0,25 – 0,30.

Проблема выбора конструкции выпарных аппаратов для современной ВУ. Мы считаем, что пленочные (трубчатые или пластинчатые) выпарные аппараты – это неизбежное техническое решение при комплектации экономичных ВУ большой мощности.

Эти аппараты, за счет повышенного на 30...40 % коэффициента теплопередачи, гарантируют, прежде всего, эксплуатационно технологические преимущества:

- минимизацию востребованных температурных напоров по корпусам ВУ и не «напряженный» температурный режим при возрастании числа корпусов ВУ;
- минимизацию потерь сахара от термического разложения и нарастания цветности сиропа.

Финансовая сторона вопроса выглядит следующим образом.

Предложение (2007 г.) завода-изготовителя «СМЗ» (Украина) – 243 \$/м² трубчатой поверхности теплообмена аппарата с естественной циркуляцией.

В то же время предложение фирмы “Wiedemann Polska” (2007 г.) составляет 250...300 \$/м² за поверхность теплообмена аппарата с пленочной трубчатой поверхностью.

Безусловно, транспортные, таможенные, НДС расходы, ежегодная динамика ценообразования накладывают существенную коррекцию на ценообразование аппарата. Поэтому экономическая сторона вопроса требует конкретной проработки.

Проблема защиты поверхности теплообмена от «карамелизации» пленки выпариваемого раствора. Известно, что предотвратить кризисное течение выпариваемой пленки стекающего раствора, так называемую «карамелизацию», можно, обеспечив равномерное орошение жидкостью внутреннего периметра трубок поверхности теплообмена, и предотвратив ее предельно допустимое сгущение, [1, 2].

Общепринятой мерой пленочного течения является величина расхода раствора по внутреннему периметру трубок:

- европейский показатель: β – «увлажнение» внутреннего периметра трубок, м/(час·см), [2];

- отечественный показатель; γ – «плотность орошения» внутреннего периметра трубок, кг/(м·сек) [1].

Определение предельно-минимальных значений γ^{min} (β^{min}), с учетом неравномерности конкретных конструкций генераторов пленки, которые гарантировали бы бескризисный теплообмен стекающего раствора, является крайне актуальной задачей для расчета требуемой поверхности теплообмена пленочных выпарных аппаратов.

В [2] устанавливается равное для всех корпусов ВУ значение $\beta^{\text{min}} = 8,0 - 10,0$ на выходе из трубного пучка (соответственно – $\gamma^{\text{min}} = 0,22 - 0,28$) независимо от физических свойств (в том числе от СВ) выпариваемой пленки.

Однако, по материалам исследований [1] значение γ^{min} зависит от СВ раствора в стекающей пленке, а, значит, зависит от номера корпуса ВУ и не может считаться неизменным.

В табл. 3 приведены результаты наших проектных расчетов по соковым потокам в системе VI- корпусной ВУ, оснащенной трубчатыми пленочными выпарными ап-

паратами, для одного из новостроящихся российского сахарного завода, с учетом исследований [1].

Таблица 3. *Результаты моделирования гидравлических параметров работы корпусов VI- корпусной ВУ сахарного завода мощностью 9000 т св/сут (условия бескризисности пленочного течения установлены по [1] и [2]).*

Показатель	Корпус ВУ					
	I	II	III «предшест- вующий»	IV «соко- вый»	V	VI
Площадь поверхность корпусов, м ²	4500	4500	7000	4000	3500	3000
Число трубок поверхности, шт	3791	3791	5897	3370	2948	2527
Балансовый (из предыдущего корпуса) вход сока в корпус, т/ч	352,4	266,7	184,4	424,1	102,6	93,7
Балансовый (в последующий) выход сока из корпуса, т/ч	266,7	184,4	102,6	352,4	93,7	89,0
Выпарено воды в корпусе, т/ч	85,7	82,4	81,8	71,7	8,9	4,7
Балансовая плотность орошения на выходе из труб, кг/(м·сек)	0,207	0,143	0,051	0,308	0,094	0,104
Концентрация сока на выходе из корпуса, % СВ	24,3	35,2	63,2	18,4	69,2	73,0
Предельно минимальная плотность орошения пленки раствор на выходе из трубок, кг/(м·сек)						
- по [1]	0,057	0,067	0,116	0,051	0,128	0,136
- по [2]	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Расчетная рециркуляция сгущенного сока в подтрубное и надтрубное пространство корпуса (перелив через приемную лейку), т/ч:						
- по [1]	0,0	0,0	160,0	0,0	160,0	160,0
- по [2]	54,7	140,1	397,4	0,0	156,3	125,2
Необходимая подача циркуляционного насоса, т/ч:						
- по [1]	352,4	266,7	344,4	424,1	262,6	253,7
- по [2]	407,1	406,8	581,8	357,4	258,9	218,9

Сопоставление табл. 3 свидетельствует о существенных разногласиях выводов [1] и [2] относительно расчетно-рекомендованных параметрах работы насосно-циркуляционных систем по каждому корпусу ВУ.

А это свидетельствует о различии в подходах отечественных и зарубежных фирм к комплектации насосно-циркуляционных установок по каждому корпусу ВУ.

До получения отечественными проектными организациями достоверных расчетных формул по закономерностям пленочного течения высококонцентрированных сиропов, внедрение современных ВУ будет сопровождаться трудностями в дости-

жении безопасных циркуляционно-теплообменных режимов и в достижении проектных мощностей ВУ.

Выражаем благодарность руководителям сахарных заводов России, представившим возможность ознакомиться с проектными и реальными эксплуатационными показателями современных экономичных ВУ, а также проблемами при их эксплуатации, обусловленными внедрением и освоением новых современных технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В.О. Ардашев.* Исследование теплообмена в при выпаривании гравитационно стекающей пленки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дисс. ... кандидата техн. наук /Киевская книжная типография научной книги.– К., 1983.– 25 с.
2. *П. Тебе.* Выпарной аппарат с нисходящим потоком выпариваемой жидкости в сахарной промышленности // Сахар и Свекла.– 1993.– № 1.– С.1– 4.

Уважаемые Галина Михайловна и редакторы нашей статьи !

Направляю исправленный текст статьи, направленной в наш адрес в конце октября 2008 г.

Существенная корректировка текста стала необходимой !!. Прежний текст содержал слишком много т.н. «воды» и «текстовых сложностей», которых мы во время написания статьи, к сожалению, не увидели.

От имени авторов, прошу принять к печати статью в этой уточненной редакции.

В. Филоненко

03.11.08 г.

Повторно 05.11.08.