

МВО СССР

КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ А. И. МИКОЯНА

Т Р У Д Ы
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ А. И. МИКОЯНА

12

ИЗДАТЕЛЬСТВО
КИЕВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМ. Т. Г. ШЕВЧЕНКО

1952

МВО СССР

КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМ. А. И. МИКОЯНА

ТРУДЫ
КИЕВСКОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ А. И. МИКОЯНА

12

геегп
X
ИЗДАТЕЛЬСТВО
КИЕВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМ. Т. Г. ШЕВЧЕНКО
1952

Печатается по распоряжению директора

КТИПП им. А. И. Микояна доц. ФЕДОРОВА П. Д.

Ответственный редактор доц. ФЕДОРОВ П. Д.

Редактор проф. КУРИЛЕНКО О. Д.

Проф. ГОЛОВИН П. В.
член-корреспондент АН УССР

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВЫХОДА САХАРА ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ДОБРОКАЧЕСТВЕННОСТИ ПАТОКИ

(Кафедра технологии сахаристых веществ)

В производственных условиях иногда требуется теоретически определить увеличение выхода сахара за счет снижения доброкачественности патоки. Для этого целесообразно пользоваться готовыми формулами, вывод которых мы здесь приводим.

Пусть на заводе получено кормовой патоки (в процентах по весу свеклы) M_1 . Ее состав такой: истинные сухие вещества $ИСВ_1$, сахар $Сх_1$, несахар $Нс_1$, вода v_1 , доброкачественность $Дб_1$.

Требуется определить повышение выхода сахара по весу свеклы, если доброкачественность кормовой патоки снизилась до $Дб_2$.

Определяем состав второй патоки, исходя из следующих положений. В нее перейдет воды то же количество, которое было в первой, т. е. v_1 , точно также и несахар перейдет в нее в количестве $Нс_1$. Количество же сахара, переходящего во вторую патоку, может быть определено из формулы, выражающей доброкачественность второй патоки при $Нс_1 = Нс_2$:

$$Дб = \frac{100 Сх_2}{Сх_2 + Нс_1}, \text{ откуда } Сх_2 = \frac{Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2}.$$

Всего во вторую патоку перейдет:

$$v_1 + Нс_1 + \frac{Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2}.$$

Определяем состав второй патоки.

Истинных сухих веществ $ИСВ_2$:

$$\frac{100 \left(Нс_1 + \frac{Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2} \right)}{v_1 + Нс_1 + \frac{Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2}} = \frac{10000 Нс_1}{100 Нс_1 + v_1(100 - Дб_2)}$$

Сахара $Сх_2$:

$$\frac{\frac{100 Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2}}{v_1 + Нс_1 + \frac{Дб_2 Нс_1}{100 - Дб_2}} = \frac{100 Дб_2 Нс_1}{100 Нс_1 + v_1(100 - Дб_2)}$$

Количество второй патоки находим так:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\sigma_1 + Hc_1 + Cx_1}{\sigma_1 + Hc_1 + \frac{Db_2 Hc_1}{100 - Db_2}} = \frac{100}{\sigma_1 + Hc_1 + \frac{Db_2 Hc_1}{100 - Db_2}}$$

$$M_2 = \frac{M_1 \left[\sigma_1 + Hc_1 + \frac{Db_2 Hc_1}{100 - Db_2} \right]}{100} = \frac{M_1 [100 Hc_1 + \sigma_1 (100 - Db_2)]}{100 (100 - Db_2)}$$

Количество дополнительного сахара получится:

$$Cx_d = \frac{M_1 Cx_1 - M_2 Cx_2}{100}$$

Пример 1. Пусть на заводе получено кормовой патоки $M_1 = 4,5$ по весу свеклы. Состав патоки: $ИСВ_1 = 82$, $Cx_1 = 52,07$, $Db_1 = 63,5$, $Hc = 29,93$, $\sigma_1 = 18$.

Сколько получает завод дополнительно сахара, если кормовая патока будет иметь доброкачественность 60,0?

Подставляя соответствующие значения в формулы, получим:

$$ИСВ_2 = \frac{10000 \times 29,93}{100 \times 29,93 + 18 (100 - 60)} = 80,61\%;$$

$$Cx_2 = \frac{100 \times 60 \times 29,93}{100 \times 29,93 + 18 (100 - 60)} = 48,36\%;$$

$$M_2 = \frac{4,5 \times 100 \times 29,93 + 18 (100 - 60)}{100 \times (100 - 60)} = 4,18\%;$$

$$Cx_d = \frac{4,5 \times 52,07 - 4,18 \times 48,09}{100} = 0,33.$$

На одну единицу снижения доброкачественности патоки (63,5—60,0) выход сахара составит:

$$\sigma = 0,33 : 3,5 = 0,094\% \text{ по весу свеклы.}$$

Следует иметь в виду, что величина σ не является постоянной. Это можно показать на следующем примере.

Пример 2. Пусть на заводе 4,5% патоки, в которой:

$$ИСВ_1 = 82, Cx_1 = 49,20, Db_1 = 60,0, Hc_1 = 32,80, \sigma_1 = 18.$$

Вторая патока получена с $Db_2 = 58$. Подставляя соответствующие величины в формулы, получим

$$ИСВ_2 = 81,27, Cx_2 = 47,13, M_2 = 4,32\%, Cx_d = 0,178.$$

На одну единицу падения доброкачественности патоки (60—58) выход сахара увеличивается на $0,178 : 2 = 0,089\%$ по весу свеклы вместо 0,094% в первом примере. Это зависит от начальной доброкачественности кормовой патоки.

(Получена редакцией 13 февраля 1952 г.)

Проф. ГОЛОВИН П. В.,
член-корреспондент АН УССР

К 150-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ СВЕКЛОСАХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА В НАШЕЙ СТРАНЕ

(Кафедра технологии сахаристых веществ)

В 1951 г. исполнилось 150 лет со дня получения Есиповым Я. С. в полупроизводственных условиях первой относительно крупной партии сахара. После этого свеклосахарная промышленность, развиваясь в нашей стране самобытно и вполне самостоятельно, прошла славный путь и превратилась в крупную индустрию Советского Союза. Ученые, инженеры, агрономы и другие работники сахарной промышленности внесли большой вклад как в области развития техники производства, так и в области культивирования сахарной свеклы. Особенно большие успехи были достигнуты за годы советской власти. При всемерной поддержке партии, правительства и благодаря самоотверженному труду коллектива сахарников сахарная промышленность Союза ССР по производству сахара уже в 1935 г. вышла на первое место в мире.

Кристаллический сахар был известен нашим предкам давно. О нем упоминается в документах XIII века [3, 4]. Несмотря на то, что сахар был дорог и применялся в виде лекарства, ввоз его в XVII веке заметно возрос [5]. В 1679 г. в Россию было ввезено крупнокристаллического тростникового сахара, так называемого леденца,— 42 бочки и 6 ящиков, горшечного в виде головок— 2 бочки и конфетного, полученного в результате второй и третьей кристаллизации,— 2 бочки. В XVIII веке ввоз сахара резко увеличился.

На ввозе сахара в России наживались купцы экспортирующих стран. В своей борьбе за экономическую независимость Россия стремилась освободиться от ввоза сахара. В XVIII веке было уже известно в России значительное количество различных растений, сок которых содержал сахаристые вещества [6]. В печати появляется ряд статей, рекомендующих использовать опыт сахаротростникового производства при организации новых производств [7, 8, 9]. В 1792 г. в Академии наук велись работы академиком Ловицем Т. по изучению сахаристых веществ [4, 10]. В Московском университете в 1799 г. в лабораторных условиях Биндгеймом Х. Я., впоследствии профессором того же университета [11], был получен из свеклы кристаллический сахар [10, 12, 13, 14].

Исходя из необходимости организации свеклосахарного производства, Медицинская коллегия в 1799 г., не ожидая результатов работы Биндгейма, выпустила книгу «Способ заменить иностранный сахар домашними произведениями» [15]. В этой книге подведены итоги работ в России по получению сахара из свеклы.

В сентябре 1800 г. был издан указ «Об отводе земель в южных краях России желающим разводить свекловичные плантации для

делания сахару». Этот документ является первым законодательным актом о зарождающейся сахарной промышленности [13, 16].

Создателем свеклосахарной промышленности в России является Есипов Я. С.

К работам по получению сахара из свеклы Есипов приступил в 1799 г. в селе Никольском, Подольской округи, Московской губернии. В течение первых двух лет опыты не дали надлежащих результатов (выход сахара был мал и стоимость сахара была высока). Однако дальнейшие опыты (1801 г.) увенчались успехом — выход сахара повысился, качество улучшилось, а стоимость его была относительно невысока. Этим самым Есипов заложил в нашей стране основы нового производства, независимо от заграницы, идя своим самостоятельным путем.

В 1802 г. Есипов Я. С. вместе с Бланкеннагелем Е. И. представили в Сенат «выделяемый трудами и искусством их сахар из свекловицы». Сенат пригласил Есипова, который доложил: «что доселе учинены им опыты над дешевым сахаром из свекловицы в малом только количестве и сделано оно не более пяти пудов». Сенат постановил «иметь тогда окончательное по означенным прошением Есипова суждение, когда он по построению сахарных своих заводов доставит Правительствующему Сенату по вышеописанном его отзыву от губернских правлений надлежащее удостоверение» [10].

В соответствии с документами Ленинградского исторического архива [17, 10] Есипов заключает договор с Бланкеннагелем о совместной постройке свеклосахарного завода в имении Алябьево Чернского уезда, Тульской губ. Половину имения Есипов купил у Бланкеннагеля за 9 тыс. рублей. Договор был заключен на 4½ года. Завод был построен и начал производство в 1802 г. После 7-месячной совместной работы Есипов и Бланкеннагель разошлись и заключили новый договор. В этом договоре они обязывались «представить совместное донесение правительству о результатах работы завода и всякую правительственную награду разделить пополам». Однако Бланкеннагель этот договор нарушил — он один послал донесение на имя царя о работе завода и просил о субсидии. Он получил кредит в 50 тыс. руб. сроком на 20 лет, но поделиться с Есиповым не пожелал.

Между тем, Есипов, будучи человеком широкого кругозора, понимал значение развития свеклосахарного производства в России, предвидел возможность избавиться от иностранной зависимости в снабжении сахаром, а потому всемерно стремился развивать идею организации свеклосахарного производства. Он выступает 24 января 1803 г. в «Московских ведомостях» с призывом строить свеклосахарные заводы и приглашает всех желающих учиться новому производству к себе в имение. В 1803 г. он построил второй сахарный завод в своем имении Никольском Московской губ. На этом заводе Есипов провел подготовку 24 человек, присланных для обучения новому производству. Дальнейшая судьба Есипова неизвестна. Он умер в 1806 г. После его смерти завод, очевидно, прекратил свое существование.

Следует отметить, что все достижения Есипова приписывались Бланкеннагелю. Недостаточно была оценена роль Есипова, как действительного создателя и организатора у нас свеклосахарной промышленности. Только в последнее время удалось установить истинную роль Есипова Я. С. [10, 12, 13].

Успех работы Алябьевского завода, дававшего высокого качества сахар-сырец и рафинад, а также несомненные экономические выгоды

нового производства способствовали созданию новых заводов. Этому способствовало также поощрительное законодательство, без которого свеклосахарная промышленность у нас не смогла бы развиваться. Однако, рост свеклосахарной промышленности первое время все же шел довольно медленно.

В 1812 г. общее число свеклосахарных заводов достигло 15, а в 1820 г. — 31, из них 5 — на Украине. Дальнейший рост количества заводов шел более быстрыми темпами, о чем свидетельствуют приведенные ниже данные:

Годы	1835	1840	1850	1860
Число заводов	56	140	360	427
В том числе на Украине . . .	18	64	247	287

В 1914 г. в России, включая Польшу, существовало всего 235 заводов. Падение числа заводов объясняется ростом концентрации капитала и производства, обусловленных быстрым развитием капитализма в России после отмены крепостного права.

Рост техники сахарной промышленности и переход от огневой системы к паровой привели к организации крупных предприятий за счет маломощных. Это наглядно видно по росту выработки сахара по годам, как это показано в следующей таблице:

Годы	Выработано сахара, в т	Годы	Выработано сахара, в т
1802	4,92	1884	390 000
1820	8,2	1904	742 000
1845	124 600	1910	1 694 000
1864	146 000	1914	1 705 340

В. И. Ленин по этому вопросу отмечает: «После 1861 г. развитие капитализма пошло с такой быстротой, что в несколько десятилетий совершились превращения, занявшие в некоторых странах Европы целые века» [1].

В деле совершенствования процессов и техники свеклосахарного производства особо выдающуюся роль играли ученые и инженерно-технические работники нашей Родины [18].

В 1820 г. Давыдов Д. А. впервые применил гидравлические прессы для отжимания сока из мезги, а в 1834 г. им предложен был способ холодной вымочки свеклы.

В 1821 г. Бахметьев ввел применение пара для сгущения соков и уваривания сиропов в плоских открытых котлах со змеевиками.

В 1836 г. на Михайловском заводе в б. Курской губ. был введен горячий способ очистки соков известью.

Очень крупным достижением в технике сахароварения было открытие в 1852 г. на Балаклеевском сахарном заводе способа варки утфеля на кристалл, вместо варки на волос. Честь этого открытия принадлежит варщику Фоменко И. и старосте Федосееву А. И. На том же заводе в 1854 г. был применен, по предложению Витте Н., метод закожушной пробелки утфеля паром. Эти оба метода имели очень большое значение в производстве. Они не были патентованы, а потому быстро распространились у нас и за границей. Метод закожушной пробелки паром за гра-

ницей известен под наименованием «русского способа». В 1867 г. на Сталинском заводе Толпыгин М. А. впервые вводит I сатурацию сока. Абрагам К. А. разработал в 1898 г. конструкцию фильтр-пресса, который и теперь широко применяется на сахарных заводах у нас и за границей.

В 1862 г. Менделеев Д. И. опубликовал работу по «Оптической сахарометрии», где указал на важность этого метода в сахарном производстве [19].

Отличительной чертой работы свеклосахарных заводов в России было получение непосредственно белого кристаллического сахара, минуя выработку сахара-сырца. Этот метод впоследствии был принят свеклосахарной промышленностью Америки.

Следует отметить искания русских сахаротехников в области конструирования непрерывно действующей аппаратуры. Сюда надо отнести работы в области создания конструкции непрерывно действующей диффузии Чапиковского И., Абрагама К. А. и др.

В 1889 г. Щениковский И. и Пионтковский Г. впервые предложили для фуговки сахара непрерывно действующую центрифугу.

Введение непрерывной сатурации (1910—1912 гг.) и кристаллизации утфеля второго продукта (1907 г.) на Мироновском сахарном заводе Овсянниковым Н. П. впоследствии получило широкое распространение на наших заводах.

Таковы основные достижения свеклосахарной промышленности в дореволюционное время. Благодаря этим успехам сахарная промышленность и в дореволюционное время стояла на довольно высоком уровне техники по сравнению с другими отраслями пищевой промышленности; по техническому оснащению, а также введению более совершенных методов и аппаратов наша сахарная промышленность стояла значительно выше заграничной. Однако наибольшего развития наша свеклосахарная промышленность достигла за годы советской власти.

В результате победы Великой Октябрьской социалистической революции в нашей стране в руки трудящихся были переданы все главные средства производства. Была национализирована и сахарная промышленность, о чем 2 мая 1918 г. был издан декрет за подписью В. И. Ленина. 16 января 1919 г. была осуществлена национализация сахарной промышленности и на Украине.

После национализации сахарной промышленности в нашей стране первоочередной задачей являлось ее восстановление, а в дальнейшем обеспечение ее мощного роста. Это было выполнено, и в 1935 г. сахарная промышленность вышла на первое место в мире по производству сахара.

За годы советской власти увеличилась площадь посева свеклы до 1,165 тыс. га по сравнению с 626 тыс. га в 1913 году. При этом посевы свеклы продвинулись в новые районы: Сибирь, Среднюю Азию, на Кавказ, Белоруссию, Башкирию, которые теперь уже хорошо освоились с новой для них культурой сахарной свеклы.

Большую работу провели селекционные станции. Селекционеры достигли значительных успехов в деле вывода высокосахаристых, высокоурожайных и стойких к хранению в кагатах сортов свеклы.

Успехи в борьбе за высокий урожай свеклы и ее высокую сахаристость в наших совхозах и колхозах достигнуты не только в результате самоотверженной работы передовиков и стахановцев свекловичных полей, но и в результате внедрения в производство передовой агrobiологической науки Мичурина, Докучаева, Вильямса, Лысенко.

Пионерами в деле развития стахановского движения были Мария Демченко, Марина Гнатенко и др. Теперь это движение стало массовым и мы имеем большой отряд Героев Социалистического Труда и орденосцев, давших стране урожай свеклы свыше 1000 ц/га.

Имеются большие достижения в деле длительного хранения свеклы в кагатах и в разработке рациональных мероприятий по хранению свеклы.

В этом направлении большое значение имеют работы наших ученых: Опарина А. И., Рубина Б. А., Якушкина И. В. и др. В результате большой работы длительность производства наших сахарных заводов достигла более 120 дней, вместо длительности в 80 дней в царское время, что наблюдается еще и теперь в капиталистических странах. Лебедев С. В. впервые указал на возможность переработки мороженой свеклы. Опарин А. И. совместно с сотрудниками разработал метод хранения свеклы в замороженном состоянии, что для некоторых наших районов дало возможность осуществить фактически почти круглогодичную работу сахарных заводов (240 дней).

Очень большое внимание было уделено обрезке головок свеклы. Сперва от срезки на плоскость перешли к срезке на конус, а в последнее время введен метод обрезки только верхней почки. Это дает лучшую сохраняемость свеклы в кагатах и сбережение сырья больше, чем на 10%. Затем было введено полевое кагатирование свеклы.

Много внимания было уделено технике транспортировки свеклы. На заводах были проложены железнодорожные пути нормальной и узкой колеи, применены мотовозы, построены декавильки и шоссе, устроены эстакады, а также заводы были снабжены автопарком.

Еще до Великой Отечественной войны для укладки в кагаты подвижной свеклы кагатные поля тщательно подготавливались и дезинфицировались. Для наблюдения за качеством свеклы, за условиями ее правильного хранения были организованы сырьевые лаборатории.

Ныне организуется приемка свеклы по сахаристости. Это мероприятие должно поднять ответственность колхозников за повышение сахаристости свеклы, что приведет к повышению урожая сахара с одного гектара, сокращению расхода сырья на тонну сахара, сокращению расхода по транспорту, и, таким образом, повысит экономическую рентабельность сахарных заводов.

Значительное, особенно в послевоенные годы, внимание было уделено вопросам механизации погрузочно-разгрузочных работ. Широкое применение получил погрузчик лауреатов Сталинской премии Новикова В. А. и Кичигина Н. М., а также погрузчик лауреата Сталинской премии Обрывко М. Д. и др.

Одним из крупных достижений явилось предложение Тищенко И. А. по сегментированию свекловичных семян. В дальнейшем был разработан метод получения односемячковых свеклосемян. Наконец, семена стали дражировать, дав им необходимые питательные и дезинфицирующие вещества. Все эти мероприятия сокращают потребность в рабочей силе, расход посевного материала и повышают урожай свеклы. Широко применяется гнездовой посев, в результате которого значительно повышается урожайность свеклы.

Значительные достижения имеются и в области технологии сахарного производства. В так называемых подготовительных операциях введены механизированные соломоловушки, рационализирована мойка Добровольского и вводятся контрольные транспортеры. Установлены маг-

нитные сепараторы. Везде поставлены автоматические весы. Большое внимание уделено качеству стружки, а в связи с этим обращено особое внимание на точку ножей. Очень хорошие результаты по получению высокого качества стружки дали стахановцы. В последнее время получила распространение пластинчатая стружка по предложению мастера Эртильского сахарного завода Тимофеева Н. П. и главного инженера этого завода Шевандина Д. К. Применение этой стружки увеличило мощность диффузионной батареи и снизило потери сахара на диффузии [20].

Предложен ряд непрерывно действующих диффузионных аппаратов, которые должны испытываться. Проведены работы по теории диффузии Бирюковым А. И., Розенбергом Б., Силиным П. М., Дроновым С. Ф., Кировым А. А., Волохвянским В. М., Головиным П. В.

Хотя метод очистки сахарных соков известью в количестве 2,5% остался в силе, однако в этот метод внесен ряд существенных усовершенствований. На заводах вводится предварительная дефекация с рециркуляцией недогазованного сока I сатурации, согласно предложению Япскурта В. В. и Каца В. М. Этот метод сокращает расход извести, улучшает фильтрацию соков и снижает расход холста. На ряде заводов установлена однокотловая преддефекация с клапаном-дозатором системы Карташова А. К.

Вводятся ионообменники для очистки сахарных соков и патоки. Над усовершенствованием этого метода в настоящее время работают в ЦИНСе и в АН УССР.

Введены безбарбатерные сатураторы, хорошо зарекомендовавшие себя на производстве. Установлен четкий режим работы на I и II сатурации. Определяется оптимальная щелочность на I и II сатурациях и на сульфитации. Вводятся непрерывно действующие вакуум-фильтры. Предложен ряд новых систем советских фильтров: Марьянчика В. Л., Знаменского Г. М. и др. Большие достижения на станции фильтрации имеют стахановцы (процесс методического выщелачивания). В значительной степени усовершенствована работа выпарных станций в результате исследований Кичигина М. А. и др. Стандартизирована плотность сиропа и предложены автоматы по регулированию плотности сиропа. Предложен ряд новых конструкций выпарных аппаратов: вертикальные с удлиненными трубками, прямоточный и др.

Одновременно велась работа и по теоретическому обоснованию процессов очистки (Силин П. М., Карташов А. К., Поляченко М. М., Волохвянский В. М. и др.).

Значительные успехи следует отметить в процессе варки и обработки утфелей. Благодаря нормализации работы на предыдущих станциях, удалось получить сиропы, хорошо очищенные и легко кристаллизирующиеся. В связи с изменениями, которые в процессе варки были введены стахановцами, удалось значительно сократить время варки первого и второго утфелей. Введена фуговка первого утфеля при температуре 70° и, таким образом, отказались от необходимости иметь дополнительные мешалки для охлаждения утфеля до 40°, на что требовалось около 8 часов времени. Введена пробелка утфеля водой. Внедряются полуавтоматические саморазгружающиеся центрифуги, что ведет к значительному сокращению времени фуговки.

Предложен ряд новых конструкций непрерывно действующих вакуум-аппаратов (Бурдаков Б. А., Кондак М. А., Знаменский Г. М., Зуев М. Д., Востоков А. И.). Осуществлено более четкое разделение оттенков. Осуществлено искусственное охлаждение второго утфеля в мешалках водой,

что значительно сократило время охлаждения утфеля и число мешалок. Вводятся для второго утфеля центрифуги с большим числом оборотов (1600 обор./мин.). Проведены и ведутся работы по теории и практике кристаллизации (Силин П. М., Жвирблянский Ю. М., Головин П. В., Савинов Б. Г., Поляченко М. М., Каганов И. Н. и др.).

Введена сушка белого сахара горячим воздухом с последующим его охлаждением. Осуществлена в значительной степени механизация по упаковке сахара, его транспорта в склады, а также укладка в штабеля, самый же учет сахара ведется по сменам.

В известковом отделении имеются большие достижения, связанные с механизацией известково-обжигательных печей: производится подача угля и камня скипповыми подъемниками, механизирован процесс выгрузки извести и ее подачи в барабан Мика. Применяется метод Востокова А. И. по обжигу извести с дутьем воздуха, что интенсифицирует процесс обжига и дает возможность лучше утилизировать бой. Лаверы совершенствуются путем применения кольцевых насадок.

Еще до Великой Отечественной войны было установлено много новых котлов с давлением от 15 до 34 атм.

Много котлов было экранировано по методу Кондака М. А., чем было обеспечено эффективное использование более старых котлов и повышена производительность заводских котельных. Освоено сжигание низкосортных углей — штыбов на основе работ Волкова П. И. Большая работа проведена по электрификации сахарных заводов и централизации силовых станций. Строятся мощные ТЭЦ с отдачей излишка энергии на сторону. Значительно расширены мастерские при сахарных заводах, которые в состоянии обслуживать прилегающие к ним колхозы. Созданы механические заводы и ремонтные мастерские по обслуживанию нужд сахарной промышленности. Аппаратура на заводах приведена в соответствие с производительностью заводов, а также упорядочена вся технологическая схема. Проведена большая работа по паспортизации зданий, сооружений и оборудования заводов.

Большое внимание было уделено вопросу использования отходов свеклосахарного производства. Жом не только идет на корм скоту в сыром или сухом виде, но на основании работ Яновского В. В. и ЦИНСа также используется для производства пектинового клея. Фильтр-прессная грязь частично используется для приготовления цемента. Патока используется не только на корм скоту и на производство спирта, но разработаны методы получения из нее дрожжей (Гивартовский Р. В.) и глицерина (Головин П. В. и Потапенко П. Н.).

Для обеспечения нормальной работы заводов сахарные заводы снабжены достаточным количеством контрольно-измерительных приборов. Улучшена работа заводских химических лабораторий по контролю производства. В некоторых случаях значительно уточнена и упрощена методика анализов. Разработаны методы определения в лабораторных условиях выработки и установления оптимального режима для производственных условий. Составлены Востоковым А. И., Лепешкиным И. П. расчетные таблицы для химиков.

Следует отметить проведенные большие мероприятия по технике безопасности и улучшению бытовых условий трудящихся на сахарных заводах, чего не знала сахарная промышленность в дореволюционное время.

Большое внимание также уделялось правильной организации вод-

ного хозяйства, а также насосным установкам на сахарных заводах. В этом направлении надо отметить работы Знаменского Г. М. и Чекурды А. Ф.

За годы сталинских пятилеток значительно выросли кадры сахарной промышленности. До Великой Отечественной войны в сахарной промышленности было с высшим техническим и агрономическим образованием свыше 3 тыс. человек и немного больше этого со средним образованием. Большое пополнение дал Киевский технологический институт пищевой промышленности имени А. И. Микояна. Количество сахарников, выпущенных Институтом, превышает 2000 чел. из общего количества выпущенных специалистов 4353 чел.

Таким образом, из краткого очерка основных достижений в сахарной промышленности за годы советской власти видна большая работа по оснащению сахарных заводов. Это дало основание товарищу Микояну на Пленуме ЦК ВКП(б) в декабре 1935 г. констатировать [2]:

«...по существу о старых сахарных заводах надо сказать, что многие из них — это старые коробки с новой техникой, с новой «начинкой». На многих сахарных заводах проведена огромная механизация — установлена новая аппаратура».

За годы советской власти создано два центральных научно-исследовательских института — один по сырью в Киеве (ВНИС), другой — по технологии в Москве с филиалом в Киеве (ЦИНС). Организованы групповые лаборатории, которые выполнили ряд ценных работ. Создан журнал «Сахарная промышленность», играющий большую роль в деле информации о достижениях новейшей техники и обмену опытом. Были созданы специализированные вузы и техникумы для подготовки кадров по сахарной промышленности. Каждый год организуются различные курсы для повышения квалификации инженерных и рабочих кадров. Всего этого не знала дореволюционная сахарная промышленность.

Большую организационную роль в развитии сахарной промышленности сыграло Главное управление сахарной промышленности (Главсахар), а в последнее время и Укрглавсахар. Для проведения проектных работ создан «Гипросахар» с отделением в Киеве, производящим крупные работы большого масштаба. Строительство сахарных заводов производит трест «Сахстрой».

За годы Великой Отечественной войны сахарная промышленность сильно пострадала. Ее пришлось восстанавливать заново. Однако в 1950 г., согласно Закону о пятилетнем плане, правительственное задание сахарной промышленности было выполнено и довоенный уровень был превзойден.

Теперь перед нами встает еще более грандиозная задача — увеличить производство сахара в 1955 г. на 78% по сравнению с 1950 годом. Это рисует перед нами грандиозную картину развития свеклосахарной промышленности как в области сырьевой, так и технической базы. Без сомнения, частично сырьевая база свеклосахарной промышленности будет развернута на базе вновь орошаемых земель в связи с осуществлением великих строек коммунизма. Все это ставит перед сахарниками ряд сложнейших задач как в области получения сырья, так и в области его рентабельной переработки. Эти ответственные задачи под руководством коммунистической партии, советского правительства и лично товарища Сталина будут с честью выполнены коллективом работников сахарной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленин В. И. Развитие капитализма в России, т. 3, изд. 4.
2. Микоян А. И. Пищевая индустрия Советского Союза, 1941.
3. Аристов Н. Промышленность древней Руси, 1866.
4. Ловиц Т. Примечание о извлечении сахара из естественных произведений, в России находящихся, Технологический журнал, т. I, ч. 3, 1804.
5. Костомаров Н. Очерк торговли Московского государства, 1862.
6. Палас П. С. Описание и изображение российских произрастаний, 1786.
7. «Экономический магазин», ч. II, 1780.
8. «Новый ежемесячный журнал», ч. XII, 1789; ч. XCIV, 1794.
9. Биндгейм И. Я. Наблюдение и опыт над некоторыми обыкновенно приготовленными и сырыми прозябающими растительными средствами, 1792.
10. Корчинский А. И. О возникновении свеклосахарной промышленности, ЖСП, № 11, 1950.
11. Шевырев Степа. История Московского Университета, 1855.
12. Иванов С. З. К 150-летию получения свекловичного сахара в России, ЖСП, № 11, 1949.
13. Иванов С. З. О роли Москвы в возникновении и развитии свеклосахарной промышленности, ЖСП, № 6, 1951.
14. Воблый К. Г. Опыт истории свеклосахарной промышленности, 1928.
15. Елизен Е. Способ заменить иностранный сахар домашними произведениями, 1799.
16. Полное собрание законов, т. XXVI, № 19550, 1800.
17. Ленинградский Центральный исторический архив, фонд № 379, опись № 46, № 15218, л. л. Н-12.
18. Лепешкин И. П. Об исторической роли русских в прогрессе сахарного производства, ЖСП, № 10, 1947.
19. Иванов С. З. Роль русских ученых в создании свеклосахарной промышленности, ЖСП, № 9, 1951.
20. Япаскерт В. В. Новое в технологии производства сахара, ЖСП, № 4, 1951.

(Получена редакцией 26 февраля 1952 г.)

Доц. ЖУРА К. Д.,
кандидат технических наук,
асс. ЯМПОЛЬСКИЙ Н. Я.

РАФИНАДНЫЙ КОМБАЙН СИСТЕМЫ ГОЛОВИНА П. В.

(Кафедра технологии сахаристых веществ)

В настоящее время сахаро-рафинадными заводами вырабатывается литой и прессованный рафинад. Прессованный рафинад получается в виде палочек, раскальваемых на кусочки правильной формы. Литой рафинад вырабатывается преимущественно по головному способу и в меньшей степени по способам КИ и Дикса. Главное преимущество литого рафинада перед прессованным заключается в высокой его крепости, что очень важно при перевозках и длительном хранении на складах, так как такой сахар почти не подвергается дроблению подобно прессованному. Именно в силу этих свойств производство литого рафинада не сокращается, а расширяется.

Однако головной метод производства литого рафинада имеет весьма существенные недостатки. Главными из них являются тяжелые условия труда и большая длительность производства, достигающая от роспуска песка до получения готового рафинада 90—96 часов. Кроме того, головной способ рафинирования очень громоздок. Так, например, для завода, перерабатывающего 300 т сахара-песка, требуется:

головных оцинкованных форм	52 000 штук,
разливных вагончиков	130 >
сушковых вагончиков	390 >
пробельных столов на 36 000 головок	100 >
подогревателей и вакуум-камер	45 >

не говоря уже о многих других видах оборудования.

При выработке кускового пиленого рафинада (из головного) количество правильных кусочков составляет около 55% по весу рафинада. Остальная часть сахара состоит из кусочков с неправильными гранями, бочков, носков, сподков (около 20%), пудры и крошки (20%) и мелко-колотого кондитерского рафинада (5%).

Отмеченные отрицательные стороны головного способа производства рафинада с давних пор побуждали сахарников к разработке новых способов, которые были бы более совершенными в смысле сокращения длительности производства, улучшения условий труда, упрощения оборудования и более экономичными. Таких методов было предложено немало, но большинство из них себя не оправдало в производстве и поэтому они не получили сколько-нибудь широкого распространения. Сюда следует отнести методы: Литвиненко, Сильмана, Васильева, Брикмана, Шайблера, Рашевского и Аданта.

Отмеченные методы не решили проблемы в целом и в настоящее время вопрос о разработке рационального метода получения литого рафинада остается еще не решенным.

Головин П. В. предложил рафинадный комбайн, позволяющий получать в нем литой сахар-рафинад, причем все операции — от заливки утфеля до охлаждения и передачи рафинада на разделку — осуществляются в одном аппарате. Модель опытного производственного образца такого комбайна производительностью 370 кг за один цикл приведен на рисунке (стр. 17).

Опытный комбайн представляет собой цилиндр диаметром 1350 мм, высотой 810 мм. Вверху цилиндр закрывается при помощи сферической крышки, а снизу закрыт таким же сферическим дном. Двумя горизонтальными перегородками цилиндр разделен внутри на три камеры. В горизонтальных перегородках сделан ряд прямоугольных отверстий. В верхней перегородке отверстия имеют размер 112×208 мм, а внизу 92×188 мм. В эти отверстия вставлены и заварены рафинадные формы размером 100×196 мм, а внизу 80×176 мм. Под каждым рядом форм расположена двутавровая балка с приваренным к ней выталкивателем. Все двутавровые балки сварены со стальной конструкцией. Конструкция расположена на четырех поршнях, входящих в гидравлические цилиндры. Гидравлические цилиндры приварены к нижнему днису корпуса комбайна.

Для выталкивания рафинада из форм в гидравлические цилиндры выталкивателя подается вода, чтобы создать давление 4—5 атм. Вода подается при помощи ручного насоса.

Как верхняя, так и нижняя камеры комбайна снабжены штуцерами для подключения к конденсатору с целью создания в камерах разрежения. Кроме того, комбайн снабжен штуцерами для входа и выхода холодной воды, для входа и выхода горячей воды.

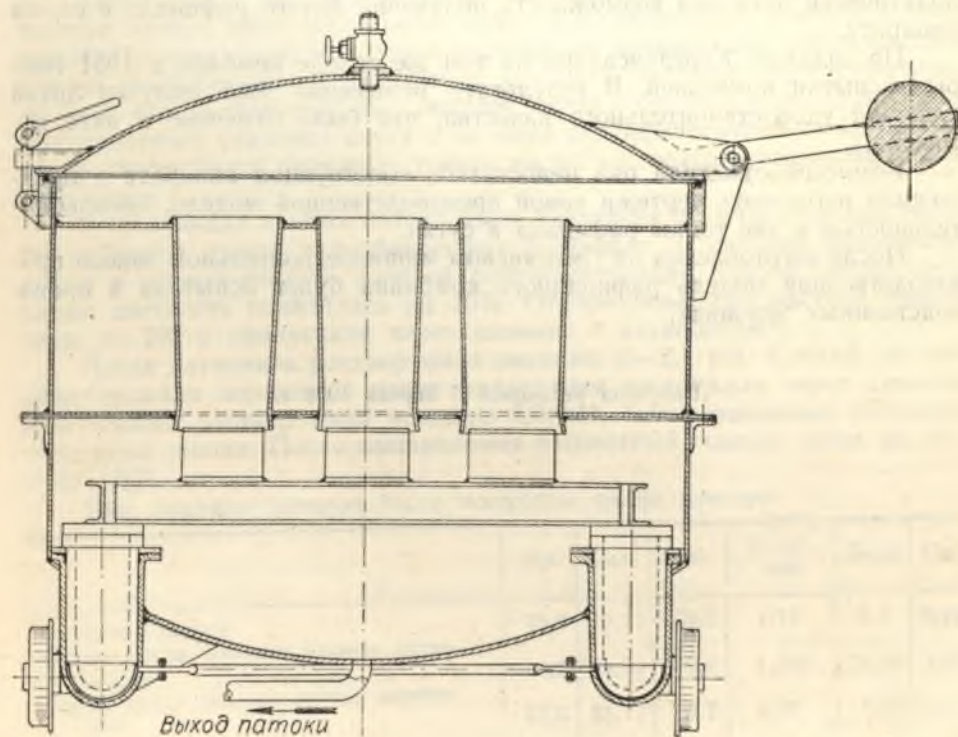
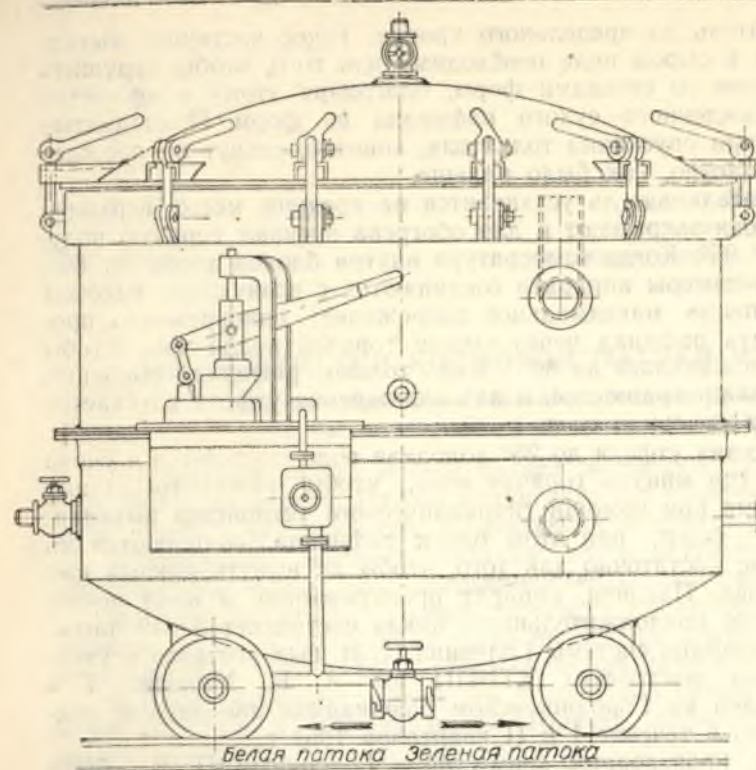
На днису камеры установлен штуцер для отвода белой и зеленой патоки при пробеливании утфеля. На верхнем днису установлен вакуумметр. Перед спуском утфеля выталкиватель ставится при помощи гидравлического насоса в такое положение, чтобы верхняя его часть зашла в форму и этим самым плотно закрыла внизу форму.

Во время работы на комбайне верхняя крышка его открывается и формы наполняются утфелем. С целью охлаждения утфеля в пространство между рафинадными формами и перегородками через нижний штуцер впускается холодная вода. Нагретая вода отводится через верхний штуцер. Для контроля температуры установлен термометр.

Впуск холодной воды прекращается, когда утфель охладился до 40° . В это же время опускается выталкивающий механизм, благодаря чему образуются зазоры между выталкивателем и формой, через которые откачивается зеленая патока. С этой целью нижний штуцер соединяется с конденсатором и в нижней камере создается разрежение.

После того как зеленая патока сойдет, начинается пробелка утфеля клерсом. Для отхода белой патоки перекрывается кран на сборник белой патоки. Когда пробелка закончена, разрежение прекращается и впускается воздух в нижнюю камеру. Во все время пробеливания поддерживается температура в 40° , для чего в среднюю камеру впускается, по мере надобности, горячая вода. После пробелки заливают утфель клерсом (слой 50 мм) и дают возможность ему войти в рафинад.

Как только клерс опустился в рафинад, при помощи выталкивателя приподымаются отливки сахара в формах на 20 мм и сразу же спу-



скается выталкиватель до предельного уровня. Такое частичное выталкивание рафинада в сыром виде необходимо для того, чтобы нарушить связь или сцепление со стенками форм, благодаря этому облегчается выталкивание охлажденного сухого рафинада из форм. Приподнятые плиты рафинада, при опускании толкателя, конечно, станут на прежнее место, но не так плотно, как было раньше.

Как только выталкиватель установится на прежнее место, верхнюю крышку герметически закрывают и для обогрева пускают горячую воду, подогретую до 90—95°. Когда температура внутри блоков достигнет 80°, верхняя и нижняя камеры аппарата соединяются с воздушным насосом и создается постепенно максимальное разрежение; одновременно продолжают обогревать рафинад через стенки горячей водой так, чтобы температура поддерживалась на 80°. Как только рафинад высохнет, выпуск горячей воды прекращается, и для охлаждения утфеля впускается в среднюю камеру холодная вода.

После охлаждения утфеля до 25° холодная вода спускается и снова впускается на две-три минуты горячая вода, чтобы разогреть стенки форм, а в это время при помощи гидравлического устройства выталкивается рафинад из форм; при этом блоки рафинада поднимаются на 100 мм, что вполне достаточно для того, чтобы их вынуть руками или прибором Пундикова. Наконец, аппарат пропаривается, и цикл повторяется снова. Общая продолжительность цикла составляет 8—10 часов.

Рафинадный комбайн системы Головина П. В. был построен в учебно-производственных мастерских КТИПП им. А. И. Микояна и в 1951 году установлен на Городищенском рафинадном заводе, где подвергался испытанию в течение I и II кварталов 1951 г.

Рядом опытов, проведенных совместно с Головиным П. В., была практически доказана возможность получения литого рафинада в одном аппарате.

По заданию Укрглавсахара на том же заводе комбайн в 1951 году был испытан комиссией. В результате испытания был получен литой рафинад удовлетворительного качества, что было отмечено в акте комиссии.

Комиссия отметила ряд недостатков конструкции аппарата и предложила изготовить чертежи новой производственной модели, производительностью в две тонны рафинада в сутки.

После изготовления на Смелянском машиностроительном заводе производственная модель рафинадного комбайна будет испытана в производственных условиях.

(Получена редакцией 5 апреля 1952 г.)

Проф. ГОЛОВИН П. В.,
член-корреспондент АН УССР;
ст. научн. сотруд. РОМАНКЕВИЧ М. Я.,
кандидат технических наук
и инж. ГИРКО И. П.

ОПЫТ ОЧИСТКИ КОРМОВОЙ ПАТОКИ ИОНИТАМИ

(Кафедра технологии сахаристых веществ Института
и Институт органической химии АН УССР)

В кормовой патоке потери сахара достигают 12% по весу сахара, введенного со свеклой. Патока непригодна для пищевых целей вследствие содержания в ней примесей, вызывающих неприятный вкус и запах.

В литературе имеются указания, что в результате очистки патоки ионитами можно получать совершенно бесцветный сироп с *дб.* 90 и выше.

В целях выявления условий работы, а также экономической эффективности этого процесса нами были проведены опыты по очистке патоки ионитами. Для опытов была взята кормовая патока с *бр.* 75,8 и *дб.* 60,3.

В первоначальных опытах мы разбавляли патоку дистиллированной водой до 25 *бр.* и подвергали ее горячей дефеко-сатурации. Расход извести составлял 0,5% по весу раствора. Сатурацию производили сразу до щелочности II сатурации. Профильтрованный и охлажденный до 20° раствор патоки пропускали через колонки с катионитом, а затем с анионитом. Пропуск через колонку с катионитом прекращали, когда раствор патоки имел реакцию 3 рН. После анионита значение рН поднималось до 7—8. После сгущения был получен сироп с *бр.* 56,3 и *дб.* 79,9. Сироп был приятного сладкого вкуса и не имел специфического запаха патоки, но цветность была понижена только на 40% и поэтому сироп был желтого цвета.

В следующих опытах патока была разведена до 5 *бр.*, так как иониты работают лучше в разбавленных растворах, и раствор подвергали, как и в первых опытах, горячей дефеко-сатурации. После дефеко-сатурации цветность понизилась на 30%. Отфильтрованный раствор охлаждали до 20° и пропускали через колонку с катионитом.

После катионита раствор имел реакцию 2—2,5 рН. Кислый раствор обрабатывали норитом и после фильтрации пропускали через анионит. Полученный раствор имел реакцию 7,5 рН, был совершенно бесцветен и не имел запаха. После выпаривания бесцветный сироп имел *бр.* 61,5 и *дб.* 90,7.

При анализе сиропов были получены такие данные:

	<i>Бр.</i>	<i>Сах.</i>	<i>Дб.</i>	<i>N об- ший</i>	<i>Зола</i>	<i>CaO</i>
Кормовая патока	75,9	45,76	60,3	1,74	8,7	0,108
Сироп после очистки патоки катионитами	56,3	44,99	79,9	1,216	6,28	0,021
Сироп после очистки патоки анионитами	61,5	55,77	90,7	0,87	1,75	0,01

Таким образом, возможность очистки патоки ионитами была подтверждена. В то же время при регенерации ионитов выяснилось, что проведение этого процесса нерентабельно.

Дело в том, что при применении обычной регенерации ионитов кислотой и щелочью нам не удалось достигнуть восстановления поглотительной способности ионитов. Емкость катионитов после двух пропусков раствора патоки и регенерации после каждого пропуска 5% раствором кислоты достигала только 30% первоначальной. Для восстановления емкости катионита необходимо было применять двойную регенерацию щелочью и кислотой.

Как показали предварительные опыты, концентрация едкого натра для регенерации должна быть 8% и количество щелочного раствора для регенерации — 180—200% от объема колонки с катионитом. Так как катионит после регенерации щелочью полностью был насыщен натрием, то расход кислоты при последующей регенерации увеличивался, приходилось регенерировать не только рабочий слой катионита, но и защитный слой, который в обычных условиях работы катионита был насыщен только на 30—50%. Расход кислоты для регенерации при данных условиях доходил до 400% от теоретического ее количества, тогда как при нормальной регенерации расход кислоты составляет 150—200%. Кроме этого, необходимо отметить, что емкость катионита даже после щелочной и кислотной регенерации полностью не восстанавливается и постепенно падает. Это можно объяснить тем, что если внутрь зерен катионита продиффундировали вещества с большим молекулярным весом, то извлечение их из катионита происходит с большим трудом или вообще невозможно.

Для выяснения возможности получения красящих и коллоидных веществ патоки в концентрированном виде были проведены следующие опыты. Колонку с катионитом регенерировали 5% соляной кислотой, промывали дистиллированной водой и затем регенерировали 8% щелочью. Раствор щелочи, выходящий из колонки, имел цвет и запах кормовой патоки. При отстаивании этого раствора на дне оседала тонкая муть; при нейтрализации выпадал осадок коричневого цвета. Отфильтрованный и промытый осадок при растворении в 3% растворе едкого натра давал коллоидный раствор темнокоричневого цвета. Из щелочного раствора красящие вещества частично можно было извлечь эфиром. Кислый раствор после отделения осадка был окрашен в красновато-коричневый цвет. Цвет раствора не изменялся при переходе реакции в щелочную (10 рН). Осадок по своим свойствам напоминал гуминовые вещества.

Таким путем, имеется возможность получить красящие и коллоидные вещества патоки в большом количестве для выяснения их состава.

На анионите наблюдались те же явления. Емкость анионита снижалась, и щелочная регенерация не восстанавливала его свойств. При регенерации 5% соляной кислотой кислый раствор был окрашен в темно-бурый цвет с запахом патоки. При нейтрализации этого раствора выпадения осадка не наблюдалось, равно как и изменения цвета. При подкисления раствора до 3 оН появлялась тонкая муть. Кислый раствор был пропущен через катионит и цветность его уменьшилась на 60%, что, по видимому, произошло за счет удаления веществ, имеющих амфотерный характер.

При очистке кормовой патоки ионитами расход реактивов и воды для регенерации и промывания колонок увеличивался почти вдвое. Срок службы катионитов резко сокращается. Все это указывает на то, что очистка кормовой патоки ионитами нерентабельна.

Выводы

1. Проведен метод очистки кормовой патоки ионитами и получен бесцветный пищевой сироп высокой доброкачественности.
2. Установлено, что расход кислоты при регенерации ионитов после очистки патоки увеличивается вдвое, а их емкость поглощения понижается и не восстанавливается полностью. Все это указывает на нерентабельность этого метода.
3. Показано, что при регенерации катионита возможно выделение красящих и коллоидных веществ патоки.

(Получена редакцией 14 июня 1951 г.)

Проф. МАЛЬЦЕВ П. М., доктор технических наук; доценты РОЙТЕР И. М., МЕТЮШЕВ Б. Д. и асс. ЗАЗИРНАЯ М. В., кандидаты технических наук; асс. ЗИНКО Б. М. и инж. ВЕЛИКАЯ Е. И.

ОСВЕТЛЕНИЕ МУТНОГО ПИВНОГО СУСЛА СЕПАРИРОВАНИЕМ

(Кафедра технологии броидильных производств)

Излагаемый вопрос является результатом дальнейших исследований по применению центробежных методов для фильтрации пивных заторов.

Новый способ выделения сусла из заторной массы подразделяется на две стадии. В первой стадии процесса затор посредством центрифугирования подвергается быстрой и грубой фильтрации с целью отделения сусла от дробины, т. е. от грубых взвесей. Полученный при этом продукт представляет собой мутное сусло, содержащее тонкие взвеси, которые и обуславливают его мутность. Отделение тонких взвесей для достижения необходимой степени осветления сусла представляет вторую стадию процесса, которая осуществляется посредством сепарирования.

Центрифугирование затора изучалось нами ранее и результаты этого исследования опубликованы¹. Исследование производилось на фильтрующей центрифуге периодического действия. При этом были установлены основные параметры процесса, необходимые для проектирования центрифуги непрерывного действия. Пользуясь этими данными, кафедра специального оборудования Института разработала проект такой центрифуги, которая изготавливается в учебно-производственных мастерских Института и по изготовлении будет испытана в заводских условиях.

Одновременно с изучением процесса центрифугирования затора проводились предварительные исследования по сепарированию мутного сусла. Для этой цели пользовались лабораторной разделительной центрифугой ($D=450$ мм). При вращении центрифуги со скоростью 1200 обор/мин. сусло через 2 мин. становилось прозрачным, а с увеличением скорости вращения до 1600 обор/мин. достигалась еще более высокая прозрачность сусла.

Дальнейшее изучение процесса осветления мутного сусла производилось на молочном сепараторе марки ОСЖ и на осадочном сепараторе, который применяется на дрожжевых заводах для осветления кормовой патоки.

ОСВЕТЛЕНИЕ МУТНОГО ПИВНОГО СУСЛА НА МОЛОЧНОМ СЕПАРАТОРЕ

При испытании молочного сепаратора для осветления мутного сусла необходимо было отделить небольшое количество осадка с большим удельным весом от значительно превосходящего количества сусла с мень-

¹ Применение центрифугирования при получении пивного сусла, Труды КТИПП им. А. И. Микояна, в. 11.

шим удельным весом. Ввиду этого в сепараторе совершенно закрывались отверстия, предназначенные для вывода обрата. Таким образом, аппарат испытывался как осадочный сепаратор, в котором взвешенные вещества оседали на стенках ротора, а из отверстий, предназначенных для вывода сливок, должно было выходить осветленное сусло.

Молочный сепаратор испытывался при 8300 обор/мин. При данной конструкции сепаратора и указанном числе оборотов достичь осветления сусла не удалось. Было установлено, что на внутренней конической поверхности ротора сепаратора, в нижней его части, откладываются взвешенные, обуславливающие мутность сусла, частицы. Этот осадок легко взмучивается. Повидимому, без изменения конструкции молочный сепаратор не даст положительных результатов. Однако, чтобы дать утвердительный ответ на поставленный вопрос, следует произвести испытание при значительно большем числе оборотов сепаратора, по крайней мере при 10 000 обор/мин. Также необходимо выяснить возможность непрерывного удаления осадка при наличии выводных отверстий, расположенных по окружности ротора. Для этого требуется просверлить отверстия в нижней части ротора сепаратора и установить форсунки, по которым будет удаляться образующийся осадок. Кроме того, следовало бы переделать ротор, заменив его тарелки на цельные, не имеющие отверстий. Такое конструктивное изменение, по нашему мнению, обеспечит лучшее разделение суспензии. При указанной переделке сепаратора мутное сусло будет проходить ближе к наружным стенкам ротора. Благодаря удлинению пути прохождения сусла в аппарате и удалению этого пути от оси вращения возрастет центробежная сила, действующая на сусло. Следовательно, отделение взвешенных частиц, несомненно, будет более интенсивным, а осветление сусла более совершенным.

ОСВЕТЛЕНИЕ МУТНОГО ПИВНОГО СУСЛА НА ОСАДОЧНОМ СЕПАРАТОРЕ

Устройство осадочного сепаратора. Сепаратор (рис. 1) состоит из пяти осадочных цилиндров 1, закрепляемых в вертикальном положении между двумя дисками. Один из дисков 2 служит дном, а второй 3 — крышкой для всех цилиндров. Сборка цилиндров производится в барабане 4, который закрывается крышкой 5.

Жидкость, подлежащая сепарированию, подается в средний цилиндр ротора. В днище и крышке ротора имеются распределительные пазы. Вследствие такого устройства жидкость из первого (среднего) цилиндра поступает снизу во второй цилиндр, а из второго цилиндра — сверху в третий цилиндр и таким образом проходит через все кольцевые пространства, образуемые стенками цилиндров, как указано стрелками на рис. 1, и поступает в кольцевое пространство между наружным цилиндром и барабаном. Из этого кольцевого пространства жидкость поступает в каналы, расположенные с наружной (верхней) стороны крышки, и отводится в приемник.

Во время сепарирования жидкости взвешенные частицы осаждаются на поверхности цилиндров ротора. Удаление осадка производится при остановке сепаратора и разборке ротора, т. е. периодически.

Ротор в собранном виде опирается на вертикальное веретено, которое через две фрикционные передачи, червячный редуктор и ременную передачу приводится в движение от электромотора. При работе сепаратора ротор делает 7000 обор/мин. Количество оборотов ротора контролируется счетчиком, которым снабжен сепаратор.

Выбор этого сепаратора для данного исследования объясняется рядом причин. Во-первых, на таком большом заводском аппарате можно более точно установить количество взвешенных веществ, обуславливающих мутность сусла. Во-вторых, в таком сепараторе можно лучше изучить процесс осаждения взвешенных веществ по пути движения мутного пивного сусла и установить их размеры и физические константы. Кроме того, возникла мысль о возможности использования этого сепаратора для

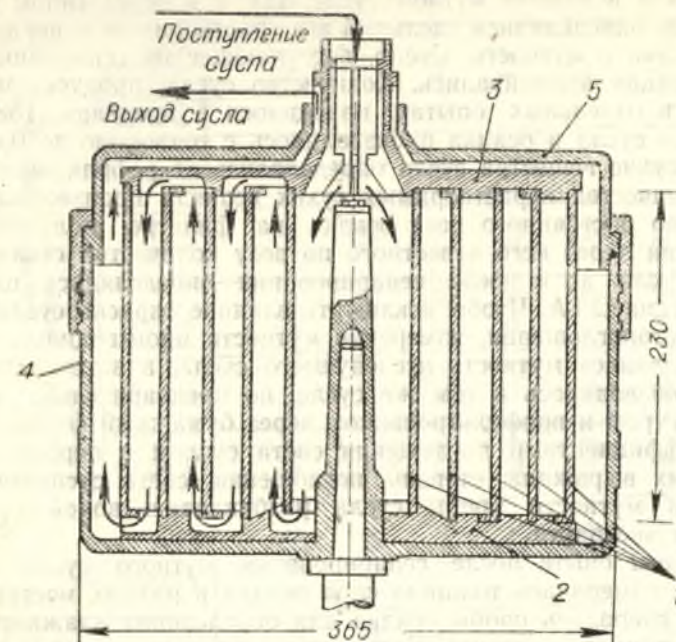


Рис. 1. Схема ротора осадочного сепаратора.

осветления мутного пивного сусла на пивоваренных заводах. Это было бы первым шагом внедрения новой техники фильтрации; однако в дальнейшем необходимо конструирование непрерывно действующего сепаратора. В соответствии с предполагаемой возможностью использования сепаратора необходимо было выяснить, какое максимальное количество осадка может быть задержано в нем, а следовательно, и какое количество мутного сусла можно пропустить через сепаратор до его очистки, связанной с разборкой аппарата.

Программа исследования. Ввиду изложенного в программу данного исследования были включены следующие вопросы:

1. Определение количества осадка, подлежащего отделению от мутного сусла для достижения необходимой степени осветления.
2. Определение размеров частичек, влажности и удельного веса различных фракций осадка, выделяющегося по ходу движения сусла в различных цилиндрах ротора.
3. Определение количества мутного пивного сусла, которое можно пропустить через сепаратор до полной загрузки цилиндров ротора осадком.
4. Сравнение степени осветления сусла, полученного сепарированием, с суслом, полученным из фильтрационного чана.

5. Определение минимальной окружной скорости сепаратора, при которой достигается необходимая степень осветления.

6. Выяснение необходимости промывания осадка для извлечения экстрактивных веществ.

Методика исследования процесса осветления мутного пивного сусла на осадочном сепараторе заключалась в пропуске через него определенного количества сусла и определении количества осветленного сусла и осадка. Как в исходном мутном сусле, так и в осветленном сепарированном сусле определялись удельный вес, растворимые и нерастворимые сухие вещества и мутность. Сусло, поступающее на сепарацию, и получаемые фракции взвешивались. Количество сусла, пропускаемого через сепаратор, в отдельных опытах находилось в пределах 158—298 кг. Взвешивание сусла и осадка производилось с точностью до 0,05 кг. Растворимые сухие вещества сусла определялись по рефрактометру. Определение количества нерастворимых сухих веществ производилось высушиванием до постоянного веса осадка на фильтре, полученного при фильтровании через него известного по весу количества сусла. Степень мутности сусла до и после сепарирования определялась цветометром МОСКИП типа ЦЗ-А. Чтобы исключить влияние окраски сусла на коэффициент светопоглощения, измерение мутности производилось так: сначала определялась мутность исследуемого сусла, а затем второе определение производилось в том же сусле, но предварительно обработанном кизельгуром и профильтрованным через бумажный фильтр. Разница между коэффициентами поглощения света суслом в первом и втором определениях выражала степень поглощения света суспензиями. При определении мутности пробы сусла разбавлялись водой до 10%-ного содержания экстракта.

В каждом опыте после сепарирования мутного сусла сепаратор разбирался, измерялась толщина слоя осадка в разных местах каждого цилиндра, отбирались пробы осадка для определения влажности, удельного веса и размера частичек. Количество осадка определялось в каждом цилиндре. Определение влажности осадка производилось высушиванием до постоянного веса, а удельный вес определялся по обычной методике, принятой для этого определения в твердых телах. Размер частичек осадка определялся микроскопированием.

По изложенной методике было проведено семь опытов. В одном из этих опытов произведена промывка осадка водой для проверки количества экстрактивных веществ, остающихся в осадке. Особой необходимости в такой проверке не было, так как в каждой пробе осадка производилось определение растворимых и нерастворимых веществ, но это было произведено в качестве дополнительного контроля.

Для выяснения влияния числа оборотов сепаратора на степень осветления сусла был поставлен восьмой опыт; в котором пропускатель через сепаратор сусло однородного качества, но при разном числе оборотов (от 7000 до 2000), и в полученном осветленном сусле определялась прозрачность.

Результаты исследования. Показатели, характеризующие содержание экстрактивных и нерастворимых веществ в мутном, осветленном сусле и осадке, приведены в таблице 1.

Данные этой таблицы представляют и баланс сухих веществ для каждого опыта в отдельности. Результаты исследования позволяют определить производительность сепаратора, объем осадка и другие характерные показатели, приводимые ниже.

Таблица 1

№ опыта	Количество оборотов сепаратора, в мин.	Продолжительность опыта, в мин.	Мутное сусло				Осветленное сусло				Осадок						
			Количество, в кг	Экстрактивных веществ, в проц.	Нерастворимых веществ, в проц.	в кг	Количество, в кг	Экстрактивных веществ, в проц.	Нерастворимых веществ, в проц.	в кг	Количество мутного сусла, в проц.	Влажность, в проц.	Содержание сухих веществ, в проц. по весу сусла	растворимых	нерастворимых		
1	7000	12	298,0	18,2	54,2	0,70	2,1	292,3	18,2	53,2	0,35	1,0	5,7	1,9	69,5	0,7	1,0
2	7000	9	215,6	19,2	41,4	0,60	1,3	212,8	19,2	40,9	0,29	0,6	2,8	1,3	72,4	0,4	0,4
3	7000	7	193,3	19,2	37,0	0,65	1,2	189,6	19,2	36,5	0,36	0,7	3,7	1,9	73,2	0,5	0,5
4	6000	5	157,9	20,2	34,7	0,52	0,8	155,8	20,2	4,3	0,26	0,4	2,1	1,3	70,0	0,3	0,3
5	5500	9	220,1	19,6	43,1	0,55	1,2	216,2	19,6	42,3	0,32	0,7	3,9	1,8	72,2	0,6	0,5
6	4500	10	277,4	20,4	56,6	0,48	1,3	271,5	20,4	55,4	0,18	0,5	5,9	2,1	73,6	0,9	0,7
7	4500	10	249,8	19,4	48,5	0,57	1,4	245,7	19,4	47,6	0,35	0,9	4,1	1,6	72,5	0,6	0,5

Производительность сепаратора определялась следующим образом. Сусло заливалось в аппарат порциями, по 10—12 л, так как над сепаратором не было напорного резервуара. При указанном способе подачи сусла в аппарат скорость сепарирования была неравномерной. Поэтому определялась не максимальная, а средняя производительность сепаратора для каждого опыта, полученная делением количества сепарированного мутного сусла на время работы сепаратора. Эти данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

№№ опытов	Количество оборотов сепаратора, в мин.	Температура мутного сусла, в град.	Скорость сепарирования, в л/мин.
1	7000	44	25
2	7000	35	24
3	7000	33	28
4	6000	53	32
5	5500	39	24
6	4500	17	28
7	4500	45	25

На основании данных, приведенных в таблице 2, средняя скорость сепарирования равна 27 л/мин., или 1,6 м³/час.

Пробы сепарированного сусла, отобранные при минимальной и максимальной производительности сепаратора в условиях опытов, не отличались по степени прозрачности, несмотря на различие температур мутного сусла, поступавшего в сепаратор. Влияние температуры в данном случае не сказалось потому, что число оборотов ротора не было доведено до максимально допустимой скорости для сепаратора данной конструкции. При проведении опытов в этом не было необходимости, так как выделение осадка достигалось при значительно меньших скоростях.

Содержание взвешенных веществ в мутном и сепарированном сусле является весьма важным показателем. Разность этих показателей служит качественной характеристикой работы аппарата и тем самым дает направление при конструировании сепаратора, предназначенного для осветления пивного сусла.

Установлено, что содержание нерастворимых взвешенных веществ в мутном сусле находится в пределах 0,5—0,7% по весу сусла, считая на абсолютно сухое вещество.

Здесь следует указать, о каком мутном сусле идет речь, так как прозрачное пивное сусле, получаемое на существующих фильтрационных установках, с понижением температуры становится также мутным. В данном исследовании мутным сусле называется продукт, полученный после грубой фильтрации затора, что имеет место при центрифугировании затора или в начальный момент фильтрации затора при использовании для этой цели фильтрационного чана. В таком мутном сусле, кроме тонких взвесей, может находиться незначительная часть и грубых суспензий.

При проведении опытов сусле отбиралось из кранов фильтрационного чана при непрерывном интенсивном размешивании затора. Следовательно, затор только процеживался через фильтрационное сито и из кранов вытекало мутное сусле, подвергаемое в дальнейшем сепарированию. В сепарированном сусле содержание нерастворимых взвешенных веществ было значительно меньше, чем в исходном сусле, и находилось в преде-

лах 0,18—0,36% по весу мутного сусла, считая на абсолютно сухое вещество.

Влажность и консистенция сепараторного осадка являются такими показателями, которые необходимы при конструировании нового сепаратора, предназначенного для осветления пивного сусла, и без которых нельзя обойтись при определении количества экстракта в осадке; это нужно знать для решения практически важного вопроса: промывать или не промывать осадок.

В сепараторе сусле проходило последовательно через цилиндры разного диаметра, но вращающиеся с одинаковым числом оборотов. Следовательно, окружная скорость цилиндров была разной. Поэтому можно было ожидать, что осадок в больших цилиндрах будет более сухим, так как он подвергается большему давлению. Ввиду этого пробы осадка на влажность отбирались с поверхности каждого цилиндра и барабана. Исследованием же установлена иная закономерность: чем больше диаметр цилиндра, тем влажнее в нем осадок.

Данные о влажности осадков приведены в таблице 3.

Таблица 3

№№ опытов	Количество оборотов сепаратора в минуту	Влажность осадка, в процентах весовых					в барабане
		в первом цилиндре	во втором цилиндре	в третьем цилиндре	в четвертом цилиндре	в пятом цилиндре	
1	7000	65,9	67,2	71,3	72,2	74,8	—
3	7000	70,0	74,4	73,8	—	—	77,6
4	6000	66,4	69,5	71,5	72,6	—	—
5	5500	67,3	70,5	72,0	75,2	75,9	75,1
6	4500	67,0	72,0	73,4	75,5	77,3	—

Из приведенных данных видно, что влажность сепараторного осадка колеблется от 66 до 78%. На основании этих данных приходим к выводу, что влажность осадка зависит не только от центробежной силы, но также от его состава и структуры. Осадки первых цилиндров, которые находятся ближе к оси вращения, содержат преимущественно поверхностные частички солодового зерна, мельчайшие частички шелухи, т. е. характеризуются главным образом содержанием клетчатки. В цилиндрах с большим диаметром осадки состояли из частичек меньших размеров, в основном из углеводов (до 60%) и белков (до 10%). Осадки отличались также и по своей структуре. В первых двух цилиндрах они имели плотную структуру. У входа в третий цилиндр откладывался осадок, содержащий мелкие частички измельченной дробины, в остальной же части цилиндра осадок по своей структуре походил на пореобразную массу, состоящую из мельчайших частичек. Эта масса подвижна и при наличии небольшой конусности легко сползала бы с поверхности. На последних цилиндрах откладывается более подвижная масса осадка, которая при легком постукивании сползает с поверхности цилиндров под влиянием собственного веса.

Размеры частичек осадка определялись посредством микроскопа с заранее прокалиброванным микрометрическим прибором. Осадки для этой цели отбирались из разных цилиндров после остановки сепаратора.

Места отбора проб отмечены на рис. 2 кружочками и там же занумерованы. В таблице 4 приведены размеры частичек различных осадков.

Таблица 4

Номера цилиндров	Номера проб осадка	Размеры частичек, в мм	Весовой процент отдельной фракции от веса всего осадка
Второй	2'	0,5 — 0,8	17
	2''	0,02 — 0,2	
Третий	3'	0,025 — 0,1	35
	3''	0,025 — 0,1	
Четвертый	4	0,012 — 0,075	27
Пятый	5	0,012 — 0,062	7
Барабан	6	0,006 — 0,025	9

Содержание экстрактивных веществ в сепараторном осадке служит основным показателем для решения вопроса о необходимости его промывки. Такие данные, полученные для каждого опыта расчетом по весу и влажности осадка и концентрации сухих веществ в фильтрате сусла, приведены в абсолютных единицах в таблице 1.

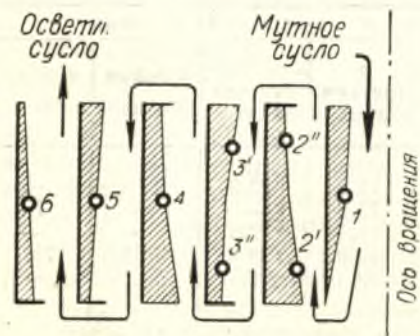


Рис. 2. Места отбора проб для определения размеров частиц осадка.

Но для того, чтобы иметь ясное представление о возможных потерях в производстве без промывания сепараторного осадка, необходимо абсолютное содержание экстрактивных веществ в осадке отнести к весу мутного сусла, к весу экстрактивных веществ того же сусла и к весу эквивалентного количества солода с экстрактивностью в 75%, как это принято в подобных расчетах. После соответствующего расчета получаем данные, приведенные в таблице 5.

Содержание вымываемого экстракта в сырой дробине колеблется от 0,35 до 0,5% и бывает выше, но не должно превышать 1,0%. В пересчете по весу солода эта потеря соответствует 0,42—0,6% и как максимум 1,2%. Указанные в таблице 5 размеры потерь экстракта в сепараторном осадке не превышают этих норм.

Следует отметить, что в данном исследовании сусло для сепарирования бралось преднамеренно с большим количеством осадка. В центрифугированном же сусле, несомненно, будет меньше взвешенных веществ, и, следовательно, потери экстракта с осадком будут меньшими. Однако необходимо стремиться к снижению производственных потерь и в соответствии с этим предусмотреть устройство для промывки осадка при конструировании нового сепаратора с непрерывным выводом осадка.

Объемный вес осадка определялся в пробах, отобранных из разных цилиндров, так как в них откладывался осадок неодинаковой структуры. К тому же, осадок подвергался различному давлению, возрастающему по мере увеличения диаметра цилиндров. Данные об удельном весе осадка представлены в таблице 6.

Таблица 5

№№ опытов	Количество оборотов сепаратора, в мин.	Количество мутного сусла, в кг.	Содержание экстрактивных веществ в сусле		Содержание экстрактивных веществ в осадке			
			в процентах весовых	в кг	в кг	в процентах по весу сусла	в процентах по весу экстракта сусла	в процентах по весу солода
1	7000	298,0	18,2	54,2	0,7	0,23	1,28	0,96
2	7000	215,6	19,2	41,4	0,4	0,19	0,97	0,73
3	7000	193,3	19,2	37,0	0,5	0,26	1,35	1,01
4	6000	157,9	20,2	34,7	0,3	0,19	0,86	0,64
5	5500	220,1	19,6	43,1	0,6	0,27	1,38	1,03
6	4500	277,4	20,4	56,6	0,9	0,32	1,58	1,18
7	4500	249,8	19,4	48,5	0,6	0,24	1,24	0,93

Таблица 6

№№ опытов	Количество оборотов сепаратора в минуту	Удельный вес осадка, в кг/л						Средневзвешенный удельный вес осадка
		из первого цилиндра	из второго цилиндра	из третьего цилиндра	из четвертого цилиндра	из пятого цилиндра	из барабана	
2	7000	—	—	—	—	—	—	1,21
4	6000	—	1,10	—	1,15	—	—	1,12
5	5500	1,16	1,10	1,09	1,11	1,15	1,09	1,10
6	4500	1,13	1,04	—	1,03	1,07	1,02	1,05

Из приведенных данных видно, что объемный вес осадка увеличивается с увеличением числа оборотов сепаратора и находится в пределах 1,05—1,21 кг/л при изменении количества оборотов от 4500 до 7000 в минуту. Изменение же в объемном весе проб осадка из разных цилиндров сепаратора незначительное и объясняется лишь различной структурой и составом осадка.

Предельная пропускная способность сепаратора данной конструкции зависит от объема цилиндров ротора, заполняемых осадком. Количество осадка, которое может поместиться в роторе, определяется по размерам ротора и по объемному весу осадка. Полный объем ротора определяется по его основным размерам, показанным на рис. 3. Из рисунка видно, что толщина цилиндрических колец, образуемых осадком, лимитируется шириной бортов цилиндра. Подсчитывая объем этих цилиндрических колец, получаем для первого цилиндра:

$$V_1 = 0,785 (d_1^2 - d_2^2) H = 0,785 (1,13^2 - 0,97^2) 2,30 = 0,62 \text{ л,}$$

где:

V — объем, в л,

d_1 — больший диаметр, в дм,

d_2 — меньший диаметр, в дм,

H — высота цилиндра, в дм;

Соответственно для второго цилиндра	$V_2 = 1,42$ л,
" " третьего "	$V_3 = 2,15$ "
" " четвертого "	$V_4 = 2,86$ "
" " пятого "	$V_5 = 1,75$ "
" барабана	$V_6 = 0,53$ "

Следовательно, суммарный объем осадка, который может поместиться в роторе при его полной загрузке, составляет 9,33 л. Если воспользоваться данными таблицы 6 и принять наибольший удельный вес осадка равным 1,2 кг/л, то получим, что в сепараторе может поместиться $9,33 \cdot 1,2 = 11,2$ кг осадка.

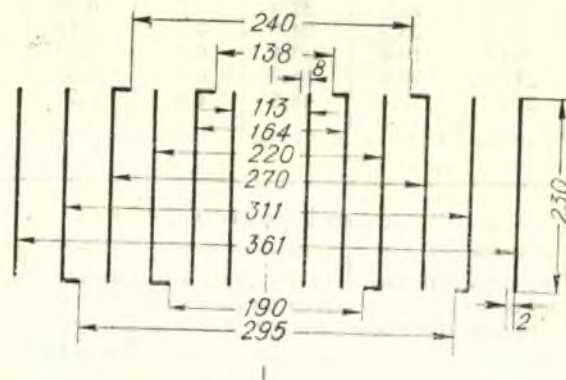


Рис. 3. Размеры деталей ротора осадочного сепаратора.

Из таблицы 1 видно, что количество влажного осадка колеблется от 1,3 до 2,1% по весу мутного сусла. Принимая среднее количество осадка по весу мутного сусла в 1,7%, получаем, что через сепаратор до полной загрузки ротора осадком можно будет пропустить сусла $\frac{11,2 \cdot 100}{1,7} = 660$ кг.

Если же допустить, что осадок будет откладываться со стороны, противоположной борту, слоем в полтора раза больше ширины борта, то и в таком крайнем случае количество сусла, которое возможно будет пропустить через сепаратор до его остановки, будет находиться в пределах 1 м^3 . Следовательно, при средней производительности сепаратора в $1,6 \text{ м}^3/\text{час}$ его необходимо будет останавливать для чистки через 35—40 минут в зависимости от содержания взвешенных веществ в сусле. При равномерной подаче мутного сусла на аппарат его производительность может быть увеличена по крайней мере вдвое, что, в свою очередь, потребует чистки сепаратора через каждые 20 минут.

На основании данных, приведенных в таблице 1, можно принять количество сепараторного осадка равным 6% по весу солода. Следовательно, через данный сепаратор до чистки будет пропускаться количество мутного сусла, полученного из 190 кг солода. Для осветления сусла, полученного при затирании 1,5 т солода, потребуются восьмикратная остановка сепаратора.

Степень осветления сусла при сепарировании представляет производственный интерес. Поэтому в нашем исследовании выяснялось, какой степени осветления сусла можно достичь на сепараторе данной кон-

струкции и при каком минимальном числе оборотов ротора достигается такая же прозрачность сусла, как и при существующих методах фильтрации.

Для решения этих вопросов сепарированию подвергалось сусло разной степени мутности. Из данных таблицы 1 видно, что содержание взвешенных веществ в мутном сусле колебалось в разных опытах от 0,5 до 0,7% по весу сусла, считая на абсолютно сухое вещество. Несмотря на это, сепарированное сусло во всех опытах по внешнему виду не отличалось от охлажденного фильтрованного сусла, полученного из фильтрационного чана. При рассматривании через это сусло электролампочки в 40 ватт была резко видна нить накаливания.

Таким образом, видимого резкого влияния степени мутности исходного сусла на прозрачность сепарированного сусла замечено не было, хотя, чем больше взвешенных веществ содержалось в мутном сусле, тем их больше было в сепарированном сусле. Это видно из той же таблицы 1. Отсюда может быть сделан вывод, что изменение содержания взвешенных веществ в сепарированном сусле в диапазоне 0,18—0,36% заметного влияния на его прозрачность не оказывает.

Для определения влияния числа оборотов сепаратора на мутность сусла был поставлен специальный, восьмой опыт. В этом опыте через сепаратор пропусклось одинакового качества мутное сусло, но при разном числе оборотов сепаратора. Экстрактивность сепарируемого мутного сусла была равной 18,2%, а содержание в нем нерастворимых взвешенных веществ равно 0,59%. В данном случае пробы сепарированного сусла отбирались при разном числе оборотов сепаратора и сопоставлялись по прозрачности. Чтобы иметь объективное суждение о прозрачности отобранных проб, мутность сусла определялась по методике, изложенной на стр. 26. Одновременно в тех же пробах сусла определялось содержание нерастворимых взвешенных веществ путем фильтрования сусла через бумажный фильтр и последующего высушивания этого фильтра до постоянного веса. Полученные данные представлены в таблице 7.

Таблица 7

Показатели	Мутное сусло	Количество оборотов сепаратора в минуту					
		7000	6000	5000	4000	3000	2000
Содержание взвешенных веществ, остающихся на фильтре, в проц. по весу сусла	0,59	0,16	0,18	0,22	0,24	0,31	0,33
Коэффициент светопоглощения в сусле:							
а) без обработки кизельгуром		0,602	0,658	0,658	0,699	0,770	0,921
б) после обработки кизельгуром		0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222
Мутность (разность а—б)		0,380	0,436	0,436	0,477	0,548	0,699

При сопоставлении данных таблицы 7 видно, что с уменьшением числа оборотов сепаратора мутность увеличивается. Особенно резкое увеличение мутности наблюдается при уменьшении оборотов сепаратора до 3000 в минуту, что характеризуется графиком, изображенным на

рис. 4. Прозрачность проб суслу, отобранных на выходе из сепаратора при числе оборотов от 7000 до 4000 в мин., по внешнему виду также отличается, но незначительно, а при числе оборотов ротора 2000 в мин. сепарированное сусло было явно мутным. Эти данные вполне согласуются с результатами ранее проведенных семи опытов, в которых сепарирование производилось при числе оборотов от 7000 до 4500 в минуту,

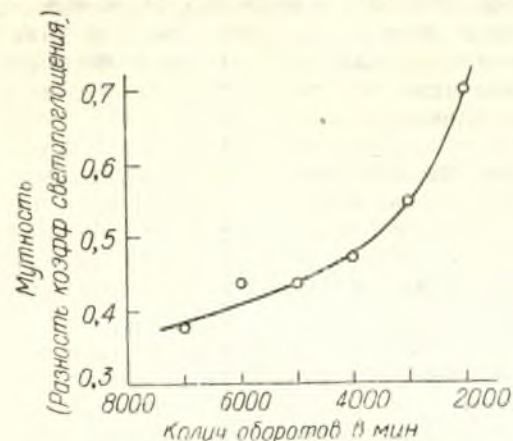


Рис. 4. Влияние количества оборотов сепаратора на процесс осветления.

причем значительного различия в прозрачности сепарированного суслу также не было обнаружено.

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что при конструировании непрерывно действующего сепаратора можно будет остановиться на минимальной окружной скорости, которая соответствует окружной скорости барабана с диаметром 0,36 м при 4000 обор/мин., т. е. 75 м/сек.

Одновременно с этим возникает и другой вопрос, нужно ли добиваться кристалльной прозрачности суслу при сепарировании, так как в дальнейшей стадии производства пива фильтрованное сусло подвергается кипячению с хмелем и в результате этого становится прозрачным. Некоторые заводы, не добиваясь кристалльной прозрачности фильтрованного суслу, получают пиво хорошего качества. Такие высказывания и утверждения имеются и в литературе. Однако это особый вопрос, который требует специального изучения.

Для предварительной же проверки этого вопроса сепарированное сусло, отобранное при разном количестве оборотов ротора и отличающееся по степени мутности, подвергалось кипячению с хмелем в лабораторных условиях. Дозировка хмеля была такой же, как в производстве при изготовлении жигулевского пива. После часового кипячения сусло оставлялось на 30 мин. в покое для осаждения хмеля, взвесей и скоагулированных белковых веществ. Затем сусло исследовалось на прозрачность. Полученные при этом данные приведены в таблице 8.

Таблица 8

Показатели	Количество оборотов сепаратора в минуту					
	7000	6000	5000	4000	3000	2000
Коэффициент светопоглощения в сусле:						
а) без обработки кизельгуром	0,523	0,678	0,678	0,553	0,553	0,699
б) после обработки кизельгуром	0,432	0,402	0,432	0,456	0,432	0,444
Мутность (разность а—б)	0,091	0,276	0,246	0,093	0,121	0,255

При сравнении данных таблицы 8 с данными таблицы 7 видно, что во всех пробах суслу после кипячения с хмелем наблюдается резкое увеличение прозрачности: коэффициент светопоглощения уменьшается в 2—4 раза, что объясняется выделением взвешенных веществ.

Для проверки полученных данных опыт был повторен в более широком масштабе. Во-первых, кроме сепарированного суслу исследовалось обычное фильтрованное сусло, отобранное из кранов фильтрационного чана. Во-вторых, кипячению с хмелем подвергалось также мутное сусло. Полученные результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9

Показатели	Фильтрованное сусло		Мутное сусло, прокипяченное с хмелем	Сепарированное сусло	
	до кипячения с хмелем	после кипячения с хмелем		до кипячения с хмелем	после кипячения с хмелем
Коэффициент светопоглощения в сусле:					
а) до обработки кизельгуром	0,553	0,481	0,569	0,745	0,523
б) после обработки кизельгуром	0,230	0,268	0,276	0,229	0,276
Мутность (разность а—б)	0,323	0,213	0,293	0,516	0,247

Из приведенных данных видно, что мутность сепарированного суслу после кипячения с хмелем (0,247) практически не отличается от мутности фильтрованного суслу, также прокипяченного с хмелем (0,213).

Результаты последнего опыта служат также подтверждением того, что мутность сепарированного суслу при кипячении с хмелем уменьшается, примерно, в два раза.

Выводы

1. Мутное пивное сусло не осветляется при пропуске его через молочный сепаратор марки ОСЖ при нормальном числе оборотов. На основании наблюдений за работой этого сепаратора даны указания, какие конструктивные изменения следует сделать, чтобы аппарат стал пригодным для этих целей.

2. При исследовании процесса осветления суслу на осадочном сепараторе определено количество осадка и содержание в нем экстрактивных веществ, а также его характерные физические показатели: удельный вес, влажность, размеры частичек и консистенция.

3. Установлено, что нормальная степень осветления сепарированного суслу достигается на осадочном сепараторе только при 4000—7000 обор/мин., что соответствует окружной скорости в 75 м/сек и проверено объективным методом по коэффициенту светопоглощения.

4. Выяснены производительность осадочного сепаратора по мутному пивному суслу и другие факторы, необходимые для конструирования специального непрерывно действующего сепаратора.

5. Установлено, что осветление мутного суслу можно производить сепарированием. Следовательно, для фильтрации пивного затора требуется комбинированная установка, состоящая из непрерывно действующей центрифуги в сочетании с непрерывно действующим сепаратором.

(Получена редакцией 24 апреля 1952 г.)

Проф. СТАБНИКОВ В. Н.,
доктор технических наук

РУССКИЕ БРАГОПЕРЕГОННЫЕ АППАРАТЫ С КОЛОННАМИ НАЧАЛА XIX ВЕКА

(Кафедра процессов и аппаратов)

История развития перегонных аппаратов, применявшихся в спиртовой промышленности, излагалась в русской отечественной и переводной дореволюционной литературе неоднократно. Однако было бы напрасным трудом искать в работах, излагающих историю перегонки, указаний на вклад, сделанный отечественными изобретателями и учеными.

В большинстве случаев в переводных немецких и французских работах собирались сведения о развитии перегонной техники во Франции и Германии, русская же перегонная техника не рассматривалась. В трудах русских авторов излагались те же сведения, что и в иностранных источниках. Русская же техника трактовалась как позаимствованная из-за границы. Даже, описывая оригинальные отечественные конструкции, раболепствующие перед иностранной техникой авторы ищут в них черты заимствования и подражания. А между тем, как и в других областях техники, в области перегонки русская техническая мысль создала интересные и своеобразные конструкции, далеко опередив заграничную технику.

В данной статье будет описана оригинальная конструкция брагоперегонного аппарата начала XIX века, не вошедшая ни в один труд по истории перегонки, но, несомненно, являющаяся ярким проявлением пытливости ума ее изобретателей, ясного представления о процессе и основательного технического опыта.

Как известно, спиртовая промышленность начала XIX века была представлена мелкими сельскохозяйственными предприятиями, принадлежащими помещикам, которые пользовались трудом крепостных.

Строительным материалом для большинства аппаратов служило дерево. Даже трубы иногда делались деревянными, сверленными. Однако, из этого совсем не следует, что аппараты, применявшиеся на этих предприятиях, были несовершенными, примитивными. Более того, как будет показано ниже, несмотря на ограничения в применении металла, русским мастерам удалось создать весьма совершенный по принципу действия брагоперегонный аппарат, получивший широкое распространение на русских винокуренных заводах. Но чтобы было ясно, насколько прогрессивна была конструкция этого аппарата, необходимо хотя бы кратко остановиться на состоянии промышленной техники перегонки бражки в начале XIX века.

Начало XIX века представляет большой интерес в истории развития техники перегонки, так как в этот период получает широкое применение паровой обогрев, а в связи с этим появляется возможность зна-

чительно усовершенствовать конструкции аппаратов. Вместе с тем винокурная промышленность в начале XIX века становится достаточно крупной отраслью промышленности, нуждающейся в более совершенной аппаратуре, что вызвало появление ряда новых конструкций перегонных аппаратов.

В начале XIX века перегонка бражки производилась, как в России, так и за границей, на периодически действующих кубовых аппаратах. Однако это не были уже аппараты простой перегонки с одним кубом.

Техника перегонки сделала к началу XIX века значительный шаг вперед и перегонные аппараты снабжались устройствами для укрепления спиртовых паров — ректификаторами и дефлегматорами. Хотя первые аппараты с колоннами были предложены в первые два десятилетия XIX века, они не получили распространения вследствие несовершенства конструкции и сложности устройства. Господствующим типом аппарата, в особенности на малых предприятиях, являлся кубовый аппарат с ректификатором и дефлегмационными тарелками. Наиболее известным представителем этого типа являлся широко распространенный в то время в Германии и России аппарат Писториуса.

Схема аппарата Писториуса представлена на рис. 1. Аппарат состоял из двух кубов 1 и 2, ректификатора 3, подогревателя бражки 4 и деф-

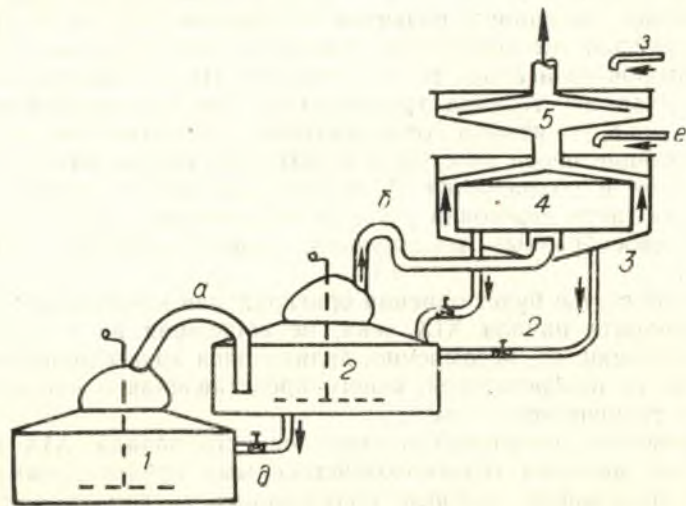


Рис. 1.

легматорной тарелки (лоханки) 5. Куб 1 подогревался на голом огне, а куб 2 подогревался отходящими топочными газами первого. Позднее перешли на паровой обогрев, сохранив тот же принцип работы аппарата. Кубы 1 и 2 наполнялись бражкой. Пары из куба 1 по трубе а поступали в куб 2. Отсюда по трубе б спиртовые пары поступали в ректификатор 3. В ректификаторе пары частично конденсировались, образуя погон. Конденсирующиеся пары отдавали тепло бражке, наполнявшей подогреватель 4. Несконденсировавшиеся пары поднимались в дефлегматорную тарелку 5, где дефлегмация происходила вследствие охлаждения тарелки водой, поступающей из трубы 3, на крышку тарелки. Охлаждающая вода подавалась также и на крышку ректификатора е.

После того как бражка в кубе была истощена, куб 1 опоражнивался, а навалка из куба 2 переводилась в куб 1. В куб 2 поступала подогретая бражка из подогревателя 4.

Как видно из описания, аппарат Писториуса равноценен колонному аппарату с тремя тарелками и дефлегматором. Ввиду несовершенства дефлегматора флегмовое число не могло быть в нем значительным, а следовательно, не мог быть получен и дистиллят высокой крепости. «Писториусовы лоханые снаряды» — дефлегматорные тарелки, с точки зрения теплотехнической, были весьма несовершенными аппаратами. Пытались улучшить работу аппаратов, устанавливая последовательно два и три «лоханых снаряда», но это приносило незначительный эффект. Между тем, устройство их было довольно сложно.

В книге «Опыт сельской технологии», изданной в 1853 г., магистр химии Александров П. перечисляет аппараты, известные ему и рекомендуемые им для установки. Здесь фигурирует аппарат Писториуса с двумя и тремя тарелками и еще более примитивный аппарат Дорна (рис. 2).

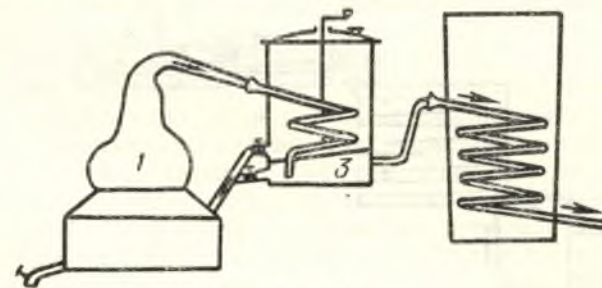


Рис. 2.

Этот последний был еще менее эффективным, так как дефлегмация в нем осуществлялась при помощи кубового шлема 1, а ректификатор весьма несовершенного устройства 3. Аппарат Дорна давал водку крепостью 35—40° Тр. А между тем в те годы, когда была издана книга Александрова, на русских винокурных заводах работали чрезвычайно оригинальные аппараты отечественного происхождения, изобретенные и построенные оставшимися безвестными мастерами. Эти аппараты получили наименование «трубницы».

Трубницы описаны в ряде книг, излагающих технологию винокурения. Упоминает о них профессор Китарры М. в своем курсе сельскохозяйственной технологии, изданной в 1862 г. Подробно описывает их Крапоткин К. в своем труде «Публичный курс винокурения», изданном в 1889 году. Крапоткин указывает примерную дату создания этих оригинальных брагоперегонных аппаратов: между 1830 и 1845 годами. Он имел возможность ознакомиться с этим аппаратом в имении Екатерины Дашковой в Могилевской губернии. Крапоткин приводит чертежи аппарата, к сожалению, без указания размеров и дает довольно неточное и неполное описание их. Не понимая процесса перегонки, Крапоткин не оценил замечательных особенностей этого аппарата, являющегося предшественником современных колонных аппаратов с трубчатыми дефлегматорами и холодильниками.

Схема трубницы показана на рис. 3.

Аппарат состоял из парообразователя 1, куба, наполняемого бражкой 2, ректификационной полочной колонны 3, трубчатого дефлегма-

тора 4, трубы 5, трубчатого холодильника 6, сосудов 7, 8, 9 и приемника 10.

Аппарат работал следующим образом. Бражка заливалась в куб 2 и кипятилась открытым паром из парообразователя 1. Спирто-водяные пары из куба 2 поступали по трубе в деревянный узкий ящик с наклонными перегородками, не достигающими до противоположных стен. Перегородки делались либо из дерева, либо из меди. Пары проходили длинный зигзагообразный путь между полками. При этом они частично дефлегмировались и флегма стекала обратно в куб 2 по наклонным тарелкам. Далее пары поступали в трубчатый дефлегматор 4. Дефлегматор имел четыре трубки, помещенные в горизонтальном деревянном ящике прямоугольного сечения. Каждая из четырех трубок делала в ящике два хода, как это видно на вертикальной проекции (рис. 3). Все четыре трубки вделаны в широкую трубу 5. В трубках дефлегматора происходила конденсация части паров. Конденсат поступал в виде флегмы в ректификационную колонну 3.

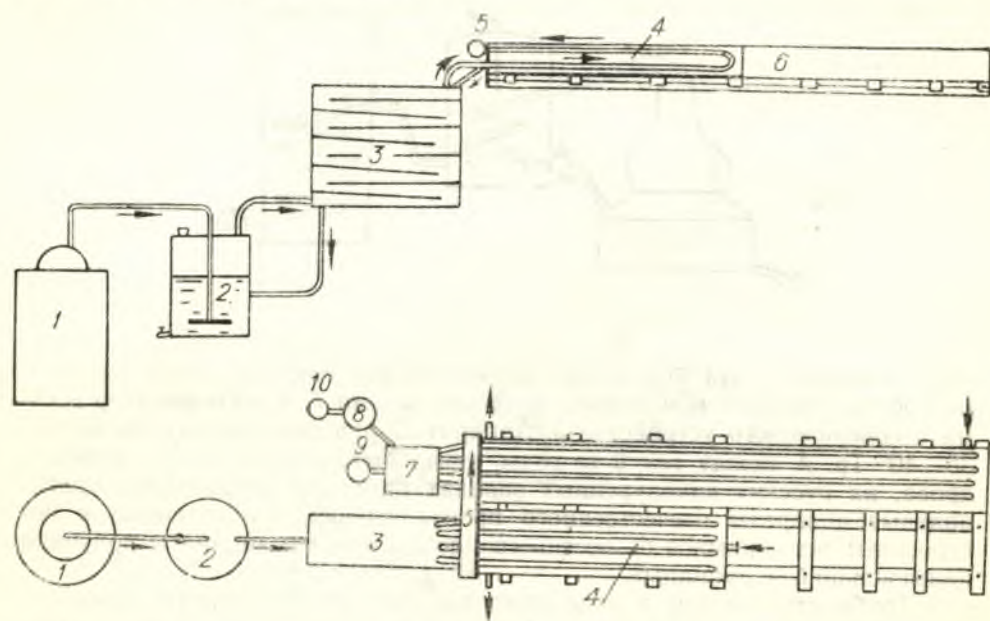


Рис. 3.

Таким образом, ящик 3 представлял собой настоящую ректификационную колонну, в которой происходил тесный контакт флегмы и пара. Восемь раз пар прорывался через жидкую завесу. Следовательно, здесь мы имели восьмиполочную колонну. Вываренная флегма непрерывно поступала по трубе в куб 2. Следовательно, и здесь конструктор аппарата предвосхитил устройство, много позднее осуществленное в колонном аппарате Савалья.

Дефлегматорные трубы охлаждались водой, поступающей в ящик. Повидимому, вода нагревалась в ящике до высокой температуры, почему дефлегматор получил название «горячая трубка».

Спирто-водяные пары, не сконденсировавшиеся в горячей трубке, поступали через «толстую поперечную трубу» 5 в трубчатый холодиль-

ник 6. Этот холодильник имел назначение сконденсировать пары. В нем также четыре более длинных трубы, каждая из которых образовывала два хода. Только в этой трубке второй ход был расположен снизу. Трубы также помещены в деревянном ящике и охлаждались водой. В этой трубке вода более холодная. Возможно, что из нее вода поступала на горячую трубку.

Холодильник получил название «холодной трубки». Из холодной трубки конденсат (сырец) поступал в деревянный ящик 7, а отсюда в чаш 8 и приемник 10. Приемник 9 служил, как пишет Крапоткин, для спуска слабоалкогольной жидкости обратно в ректификатор. Последнее не совсем ясно. Повидимому, через сборник 9 производился возврат фракций в ректификатор.

Описав этот аппарат, Крапоткин замечает: «большинство наших заводов имело такое же устройство».

Нельзя не признать, что изобретатели этого аппарата осуществили его с полным пониманием процесса перегонки. Можно сказать, что если бы современному конструктору поручили сконструировать брагоперегонный аппарат, то имея в своем распоряжении ограниченное количество медных труб и деревянные доски, он построил бы именно такой аппарат. Впрочем не следует удивляться тому, что в качестве строительного материала было использовано дерево. Многие ректификационные аппараты в то время выполнялись из дерева. Так, например, аппарат, предложенный английским изобретателем Коффеем, имел деревянную колонну и деревянный корпус дефлегматора. К сожалению, отсутствие размеров на чертежах в книге Крапоткина не позволяет определить характеристики работы аппарата: флегмовое число, крепость сырца, расход пара. Однако и без этих подсчетов ясно, что мы имеем дело с аппаратом значительно более совершенным, чем аппарат Писториуса, Дорна и им подобные.

Изучая брагоперегонные аппараты, предложенные в первые четыре десятилетия XIX века, нельзя обнаружить конструкции хотя бы отдаленно напоминающие «трубки». Это дает основания утверждать, что оставшийся неизвестным изобретатель создал совершенно оригинальную конструкцию. Изобретатель при этом ничего не заимствовал от наиболее распространенных в то время двухкубовых аппаратов, конструктивно менее совершенных, несмотря на то, что они изготовлялись целиком из меди в заводских условиях.

Брагоперегонный аппарат-трубка должен занять подобающее ему место в истории развития перегонки, как первый аппарат периодического действия с колонной, получивший широкое производственное применение.

(Получена редакцией 15 января 1952 г.)

Проф. СТАБНИКОВ В. Н.,
доктор технических наук;
инж. КРУЧИНИН В. Ф.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РОМА

(Кафедра процессов и аппаратов)

Ром — алкогольный напиток, получаемый из сока сахарного тростника или из продуктов его переработки.

Производство рома получило широкое распространение в тропических и субтропических странах, являющихся зоной произрастания сахарного тростника. Ром производится на островах Ямайке, Кубе, Порто-Рико, Виргинских, а также в Мексике, Уругвае и других странах.

В дореволюционной России ром не производился в связи с тем, что культура сахарного тростника не получила распространения, хотя вопрос о культивировании сахарного тростника поднимался еще в XVIII веке.

С 1935 года Всесоюзный научно-исследовательский институт сухих субтропиков (ВНИИСС) начал заниматься вопросом культивирования сахарного тростника в южных районах Таджикской и Узбекской ССР с целью использования этого вида сырья для производства рома. Эти опыты показали полную возможность культивирования сахарного тростника в ряде районов.

Начиная с 1938 года, Центральная научно-исследовательская лаборатория ликеро-водочной промышленности проводит работу по получению рома из советского сахарного тростника. Исследования, проведенные группой сотрудников этой лаборатории, под руководством Осминикова Н. П. дали много чрезвычайно интересных результатов и наметили пути создания технологии производства советского рома.

В связи со строительством Главного Туркменского канала вопрос о культуре сахарного тростника получает более широкий интерес.

Возникает перспектива развития тростниковосахарной промышленности с ее неизбежным отходом — меляссой, которая является превосходным сырьем для производства рома.

Все изложенное обуславливает интерес к вопросам производства советского рома. Хотя производство рома насчитывает много веков, оно не является установившимся и многие его вопросы остаются не вполне ясными. За последние годы литература по производству рома пополнилась рядом исследовательских работ, еще не получивших освещения в нашей печати.

Задача настоящей статьи заключается в рассмотрении материала, излагаемого в этих работах, а также материалов, собранных авторами во время посещения ими ромовых заводов США. В статье ставится также ряд вопросов, касающихся организации производства советского рома.

Остановимся прежде всего на вопросе: что такое ром? Как это ни странно, дать точный ответ на этот вопрос почти невозможно ввиду край-

него разнообразия продуктов, встречающихся под этим наименованием. Общим для всех этих продуктов является только то, что они производятся или из сока сахарного тростника, или же из продуктов переработки сахарного тростника, главным образом из меляссы. Полное отсутствие какой-либо стандартизации сырья, производственных приемов, а также требований к качеству продукции на капиталистическом рынке привели к появлению большого количества типов и сортов рома. Впрочем, было бы неправильным думать, что в определении принадлежности к тому или другому сорту имеется определенная степень надежности. Главным показателем остается всегда органолептическая проба на вкус и на запах, а не какие-либо объективные показатели.

Насколько различен состав напитков, именующихся ромом, показывает таблица 1.

Таблица 1

Химический анализ образцов рома

№ п. п.	Крепость в об. проц.	рН	В граммах на 100 литров						
			общая кислот- ность	летучие кислоты	эфирь	сивуш- ные мас- ла	твердый остаток	альде- гиды	фур- фу- рол
1	45	5,03	26,4	24,0	29,9	112,6	1031,6	16,7	0,32
2	45,5	—	9,6	4,8	8,8	31,7	792	0,6	0
3	44,3	5,82	4,8	4,8	11,4	58,1	40	1,6	0,4
4	49,2	—	36	24	63,3	99,3	260	16	1,6
5	60,4	—	57,6	52,8	68,6	288,6	155	20	0
6	67,6	—	184,8	148,8	216	450,6	274	48	7,2
7	48,4	4,2	96,0	86,4	55,4	212,9	110	5,9	1,2
8	55	5,38	7,2	4,8	6,16	15,8	14	1,76	0
9	45,3	—	48	38,4	105,6	62,5	316	0	1
10	36,6	—	4,8	4,8	7,0	0	254	0	0

Рассматривая данные таблицы 1, можно установить, что все определенные при анализе показатели колеблются в широчайших пределах. Некоторые из образцов рома приближаются по своему составу к стандартному спирту ректификату, другие же содержат громадное количество примесей. Такое разнообразие состава различных образцов рома определяется разнообразием сырья, способов работы, методов выдержки, а также и добавлением, при купажировании, разнообразных вкусовых и ароматических веществ.

В нескольких работах, вышедших за последние годы, делаются попытки классифицировать торговые сорта рома. Однако эта задача оказалась непосильной и авторы ограничились классификацией, построенной главным образом на географическом признаке (Ямайский, Кубинский и т. п.). Едва ли такая классификация может быть нам полезна.

Более рациональным является разделение торговых сортов рома на два основных типа: тяжелый ром и легкий ром. К сожалению, четкого определения и количественных характеристик того и другого типа также нет.

Тяжелый ром содержит значительное количество побочных продуктов алкогольного брожения, а также продуктов жизнедеятельности бактериальной флоры. В нем содержатся также и соединения, возникающие при длительном хранении сырого рома. Легкий ром содержит меньшее

количество примесей и, в крайнем случае, представляет почти чистый ректификат. Тяжелый ром обладает интенсивным специфическим ромовым ароматом и вкусом. Легкий ром имеет более слабый вкус и аромат. В литературе встречаются, кроме того, характеристики рома, занимающего среднее положение между двумя крайними типами. Так, говоря о некоторых таких сортах, называют их «средне-тяжелыми».

Совершенно ясно, что все эти характеристики весьма условны и неопределенны. Как тот, так и другой тип рома может быть получен из любого продукта переработки сахарного тростника. Таким образом, тип рома не определяется сырьем. Вместе с тем отмечается, что степень очистки от примесей при перегонке не определяет тип рома. При неправильно проведенном процессе не удастся получить тяжелый, ароматический ром, даже если совсем не отбирать при перегонке побочные продукты брожения.

Из сказанного вытекает, что одной из первоочередных задач нашей молодой ромовой промышленности является установление стандартов на советский ром, исходя из требований ликеро-водочной и кондитерской промышленности. Гибкость биохимических процессов позволит выработать продукт любого заданного качества. Поэтому при разработке технологии советского рома необходимо исходить не из стремления получить продукт, совпадающий с тем или иным заграничным образцом; задача должна заключаться в создании доброкачественного, оригинального отвечающего гигиеническим требованиям напитка, расширяющего ассортимент вкусовых и ароматических продуктов отечественного производства.

Для производства рома употребляются два вида сырья: а) сок сахарного тростника, б) мелясса тростниковосахарных заводов.

Теперь основным сырьем ромового производства является мелясса, а поэтому сырьевой вопрос освещается главным образом в отношении меляссы. Такое положение объясняется, в основном, двумя причинами: а) стоимость сбраживаемого сахара в меляссе значительно дешевле, чем в соке сахарного тростника, б) ром, полученный из меляссы, обладает в большей степени тем характерным вкусом и ароматом, который ценится в этом напитке. Указывают также, что время выдержки, необходимое для созревания рома, меньше в том случае, если сырьем служила мелясса.

При использовании в качестве сырья сахарного тростника неизбежно его хранение в течение продолжительного времени. Хранение выжатого сока тростника в течение более или менее продолжительного срока невозможно, так как обильная микрофлора тростникового сока создает большие затруднения. Следовательно, становится неизбежным его выпаривание. Для этой цели ромовый завод придется снабжать выпарной установкой, что усложнит оборудование завода. Большое содержание микрофлоры в соке тростника осложняет его переработку на ром по сравнению с меляссой, отличающейся хорошей транспортабельностью и хорошей сохраняемостью.

Как сок, так и мелясса могут быть сырьем для производства любого типа рома (как тяжелого, так и легкого), хотя органолептические свойства получаемых продуктов несколько различаются. Впрочем, это не является существенным при отсутствии каких-либо стандартов на ром и разнообразии методов работы.

На первом этапе развития ромовой промышленности в Советском Союзе, при отсутствии развитой тростниковосахарной промышленности,

производство рома неизбежно должно базироваться на соке тростника. В дальнейшем более целесообразно организовать производство на отходах тростниковосахарной промышленности.

Остановимся на составе меляссы тростниковосахарных заводов. Состав меляссы колеблется в широких пределах. В таблице 2 приведены анализы трех образцов, различных с точки зрения пригодности их для производства рома.

Таблица 2

Показатели	Оценка меляссы		
	хорошая	средняя	плохая
Брикс	87,6	85,4	88,2
Сахара (общ.)	57,97	52,91	49,93
Зола	7,31	9,35	11,57
Общий азот	1,1	0,6	0,45
Фосфорная кислота	0,19	0,09	0,21
Гуминовые вещества	2,0	2,55	3,75
pH	5,5	5,7	6,3
Аромат	хороший	средний	отсутствует

Как видно из таблицы, наиболее пригодной для производства рома считается мелясса, содержащая большое количество сахара (как сахарозы, так и редуцирующих сахаров) и среднее количество зольных элементов, необходимых для питания дрожжей. Считается, что наиболее благоприятным соотношением количества сахара к содержанию золы является 6,5:1 или выше. При соотношении от 6,5:1 до 4,5:1 мелясса оценивается как средняя, а при соотношении 4,5:1 и ниже как плохая.

Также большое значение, при оценке меляссы как сырья, имеет содержание гуминовых веществ. Указывают, что высокое содержание гуминовых веществ при брожении способствует образованию большего количества сивушных масел. Оптимум содержания P_2O_5 находится в пределах 0,2—0,25% по весу меляссы.

ПОДГОТОВКА ЗАТОРА

Подготовка затора из меляссы. Мелясса, поступающая в производство из хранилищ, смешивается с водой в таком соотношении, чтобы брикс заторной массы составил 18—21. Смешение производится в смесителях непрерывного типа или же в смесителях периодического действия. Последние представляют чаны, снабженные мешалками. Как правило, патока, поступающая в заторное отделение, не подвергается обработке или стерилизации. Имеются, правда, рекомендации производить частичную (нагрев до 80°) стерилизацию патоки при разбавлении до 55 бр., при этой температуре разбавленная патока должна выдерживаться 1/2 часа. Рекомендуется также подвергать патоку обработке известью и серной кислотой и удалять взвешенные частицы на суперцентрифугах. Однако практически такие сложные приемы работы не получили применения.

Затор, после разбавления водой, содержит около 8—10% сахара; начальный pH раствора около 5—5,5. Мелясса содержит все ингредиенты, необходимые для жизнедеятельности дрожжей; однако, в патоки,

бедные фосфором, вводят добавочный фосфор в виде суперфосфата. Недостаточное азотистое питание задается в виде сернокислого аммония.

Идеальным составом ромового затора рекомендуют следующий: бр. 18—21, титруемая кислотность ($1/10$ N щелочи на 10 мл затора) 2—3,5 мл, pH 5—5,5, общее содержание сахара (на 100 мл) 11,5—13,5 г, азота (на 100 мл) 15—100 мг, фосфора (на 100 мл) 15—20 мг.

Подготовка затора из сока сахарного тростника. Сок отжимается на вальцевых дробилках подобно тем, которые применяются в тростниковосахарном производстве. При наиболее несовершенной организации производства сок поступает непосредственно в бродильные чаны, куда задаются одновременно и дрожжи. Сок при этом не подвергается никакой обработке. В других случаях сок подвергается стерилизации и обработке известью с последующей фильтрацией. Указывают, что обработка известью (дефекацией) имеет положительное влияние на качество рома. Каких-либо указаний на различие в подготовке затора при производстве легкого и тяжелого рома не встречается. Это свидетельствует о совершенно недостаточной разработке технологии рома.

Несомненно, одним из важнейших факторов, определяющих характер продукта, является надлежащая подготовка заторной массы — среды для микроорганизмов. Этот вопрос, однако, не разработан.

БРОЖЕНИЕ

Брожение при производстве рома вполне может быть организовано по непрерывному методу, принятому при производстве этилового спирта из кормовой патоки. Однако, в настоящее время на ромовых заводах брожение проводят только периодическим способом. Сбраживание затора производится различно в зависимости от типа рома, который желают получить.

При производстве легкого рома в качестве сбраживающих микроорганизмов применяют только дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, *Chizosaccharomyces Pombe*. Выбор расы дрожжей должен быть произведен с учетом не только выхода спирта, но и способности дрожжей создать те побочные продукты брожения, которые дают рому специфический вкус и аромат.

При производстве тяжелого рома применяется, как правило, симбиотическое брожение при употреблении дрожжей и бактерий. Среди последних упоминают *Clostridium butyricum* и *Propionbacterium technicum*. Рекомендуют также представителей группы несовершенных грибов *Oidium suaveolens*.

Вопрос о необходимости проведения симбиотического брожения для получения рома тяжелого типа является дискуссионным, так как некоторые авторы полагают возможным получить тяжелый ром только за счет работы одних дрожжей, соответствующим образом подобранных. Практически вопрос решается все же с применением бактерий, которые вводятся либо в виде чистой культуры, или же при отсутствии стерилизации размножаются самопроизвольно. В этом вопросе, так же как и во многих других вопросах технологии рома, нет определенности. Является бесспорным, что различные типы дрожжей направляют свою деятельность на производство побочных продуктов брожения с различной степенью интенсивности. Это характеризуется данными таблицы 3, в которой приведен анализ сырца, полученного при сбраживании в одинаковых условиях одного и того же сула различными дрожжами.

Таблица 3

№№ рас дрожжей	Количество сивушных масел на 100 мл абс. алкоголя, в мг	Общее количество примесей на 100 мл абсол. алкоголя, в мг	Процент сивушных масел от общего количества примесей
1	157	323	48,6
2	92	350	26,23
3	250	400	62,50
4	85	240	35,41
5	101	281	35,94
6	196	349	56,16
7	188	367	51,22
8	204	440	46,36
9	179	389	46,01
10	184	353	52,12
11	349	556	62,76

Из приведенных данных ясно, что продукты жизнедеятельности отдельных рас дрожжей весьма сильно отличаются. Следовательно, вполне можно отобрать или воспитать расы дрожжей, способных в данной среде произвести необходимые нам ингредиенты в заданных соотношениях. Повидимому, в ряде случаев при производстве рома употребляют смесь нескольких рас дрожжей, работающих совместно. Наиболее важной способностью дрожжей при производстве рома является способность образовывать так называемое «ромовое масло».

В трудах различных исследователей ромовое масло упоминается как основа своеобразного аромата рома. Однако, до настоящего времени оно не выделено и не проанализировано.

Химическая характеристика ромового масла весьма неопределенна. Утверждают, что это не эфир, не альдегид или кетон, не ацеталь. Таким образом, характеристика его только отрицательного характера. При фракционированной перегонке рома он дистиллируется в следующей последовательности: первые фракции содержат этиловый спирт с примесями низкокипящих альдегидов и эфиров, после этого отходят сивушные масла и только в последующих фракциях обнаруживаются ингредиенты, обладающие запахом рома. Таким образом, ромовое масло, если оно имеется, а не представляет сочетание аромата эфиров и высших спиртов, обладает сравнительно высокой температурой кипения и низкой летучестью. Количество его, однако, столь незначительно, что до сих пор оно не получено в достаточном для исследования объеме. Утверждают, что аромат рома, в основном, создается ромовым маслом, другие же побочные продукты брожения только дополняют основной тон.

Химический анализ рома еще не дает возможности судить об его качестве, так как данные этого анализа дают только представление об общем количестве той или иной группы примесей эфиров, высших спиртов и т. п.

Для вкуса и запаха имеет значение не только количество, но и индивидуальные свойства примесей. Все же можно отметить, что количество побочных продуктов алкогольного брожения в тяжелом роме значительно больше, чем в легком.

Тяжелый ром может быть получен как из патоки, так и из сока тростника. Отмечают, что сахарный тростник не должен подвергаться

при получении тяжелого рома обработке известью, так как такая обработка содействует получению легкого рома. Бактерии маслянокислого брожения (*Clostridium saccharobutyricum*) добавляются в бродящее сусло после того, как основное брожение будет уже в значительной степени закончено и концентрация алкоголя в бражке составит около 40%. Количество задаваемых дрожжей по объему затора составляет 5—10%. Количество бактерий по объему не более $\frac{1}{5}$ по отношению к дрожжам. В дальнейшем дрожжи и бактерии работают симбиотически. Температура при складке дрожжей 30—32°. Брожение идет при температуре 30—33°. При брожении поддерживается 5,5—5,8 рН. После задачи бактерий поддерживают температуру в бродильном чане около 29—30°, а рН не ниже 5; продолжительность брожения различна. Указывают, например, что при общей продолжительности брожения 6 суток дрожжи работают 2 суток, после чего задаются маслянокислые бактерии и начинается симбиотическое брожение.

В результате жизнедеятельности бактерий бражка обогащается кислотами алифатического ряда. В основном бактерии продуцируют масляную кислоту (90%). Кроме нее, они производят уксусную, пропионовую, а также незначительное количество высших кислот этого ряда. Утверждают, что, благодаря симбиотическому брожению, уменьшается несколько количество сивушных масел и увеличивается количество эфиров; выход алкоголя при симбиотическом брожении мало изменяется по сравнению с брожением при чистых дрожжах.

Нужно отметить, что продолжительность брожения не является стабильной величиной. Она сильно колеблется в зависимости от объема дрожжевой массы и типа дрожжей. В некоторых случаях брожение продолжается до 8 суток (Виргинские острова). В результате сбраживания получается бражка, содержащая до 7—8% алкоголя по объему. Иногда зрелая бражка оставляется в покое на одни сутки. Считают, что это способствует накоплению эфиров.

Имеются указания на оригинальный способ получения тяжелого рома из сока тростника при симбиотическом брожении *Oidium suaveolens* и дрожжей. В этом случае стерилизованный тростниковый сок, содержащий 15% сахара, был первоначально засеян *Oidium*. После того, как образовалась пленка, сусло оставлялось в покое на 24—72 часа и только после этого задавались дрожжи, производившие основное брожение. Отмечается, что полученный ром отвечал требованиям, предъявляемым к рому тяжелого типа, и обладал характерным ароматом и вкусом.

Чрезвычайно важной для советской ромовой промышленности является проблема сивушных масел. Содержание сивушных масел в роме тяжелого типа весьма велико, что, несомненно, вредно для потребителя. Однако, уменьшение их количества в процессе перегонки ведет к ухудшению качества рома, так как, повидимому, при этом удаляются частично и ароматические вещества. В связи с этим стоит задача создания такой технологии, при которой количество сивушных масел в сбродившей бражке будет минимальным.

Для этого рекомендуют:

- подбирать расу дрожжей, не продуцирующих сивушные масла,
- проводить брожение при низкой температуре (25—27°),
- не задавать для питания дрожжей в сусло сульфат аммония, а только раствор аммиака.

ПЕРЕГОНКА РОМА

Для перегонки рома употребляются самые разнообразные аппараты. Их можно разбить на три группы:

1. Кубовые аппараты без дефлегматоров или с дефлегматорами.
2. Периодически действующие колонные аппараты.
3. Непрерывно действующие двухколонные или трехколонные аппараты.

Первый тип аппаратов применяется на заводах малой производительности, при этом ром-сырец подвергается повторной перегонке на тех же аппаратах. Два последних типа встречаются на современных, более крупных заводах.

Ром-сырец, получаемый при перегонке, имеет различную крепость в зависимости от типа получаемого рома. При производстве легкого рома крепость рома-сырца больше, а, следовательно, значительное количествосивушных масел задерживается в колонне. Крепость рома-сырца легкого типа достигает 90—94,5% по объему; чаще, однако, крепость рома-сырца составляет 75—80% по объему.

При получении тяжелого рома крепость рома-сырца значительно легче и опускается до 60% по объему. Отбор фракций при перегонке рома ничем не регламентируется. Перегонка, таким образом, всецело находится в руках аппаратчика, искусство которого в какой-то мере определяет успех всего производства. В литературе вопрос об отборе фракций обходится молчанием. Однако, установлено, что обычно на аппаратах с колоннами отбирают головную фракцию; в ряде случаев отбирают также и хвостовые фракции. При производстве очень легкого рома получают почти обычный ректификат, содержащий мало примесей.

На рис. 1, 2 и 3 приведены схемы трех аппаратов для перегонки рома-сырца современных заводов; первый из них представляет арханчский тип кубового аппарата с дефлегмационными тарелками Писториуса.

На рис. 1 показаны: *а* куб, *б* ректификатор простейшего типа, *в* три дефлегмационные тарелки, охлаждаемые водой, *г* холодильник. Головные продукты направляются по трубе *д* в приемник; труба *е* служит для приемки сырца. Употребляются также и двухкубовые аппараты, из которых второй куб является ректификатором. Наряду с такими архаическими кубовыми аппаратами употребляются также и кубовые аппараты с колоннами современного типа.

На рис. 2 показана схема двухколонного аппарата более совершенного типа. Аппарат этот очень похож на обыкновенный брагоперегонный аппарат, применяющийся при перегонке спирта-сырца в спиртовом производстве. Бражка поступает в аппарат из напорного бака *1*, в котором поддерживается постоянный уровень. Колонна истощения *2* имеет 20 ситчатых тарелок с диаметром отверстий 6 мм, при толщине пластины 3 мм. Расстояние между тарелками 250 мм. В верхней колонне укрепления *3* двенадцать колпачковых тарелок. При производительности 1200 дкл сырца в сутки аппарат имел диаметр верхней колонны, равным 0,65 м, а нижней 0,9 м. Аппарат обогревается открытым паром, подача которого производится регулятором типа Савая. Дефлегматор *4* и холодильник *5* трубчатого типа. В этом аппарате не предусмотрен отбор головных фракций.

В аппарате, схема которого изображена на рис. 3 мы видим три колонны: колонну истощения *1*, колонну укрепления *2* и небольшую колонку *5* для отбора головных фракций. В этом аппарате получается ром-сырец крепостью 67,5% по объему. Движение продуктов в нем про-

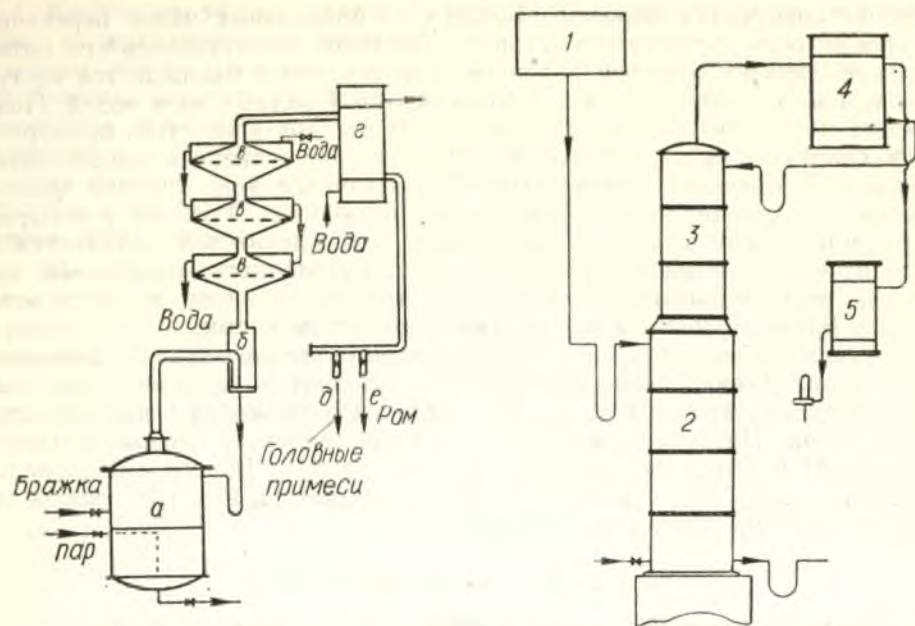


Рис. 1. Кубовый аппарат для перегонки рома
(*а*—куб, *б*—ректификатор, *г*—дефлегмационная тарелка, *д*, *е*—трубы для отвода фракций).

Рис. 2. Схема двухколонного аппарата для перегонки рома
(1—напорный бак; 2—бражная колонна; 3—ректификационная колонна; 4—дефлегматор; 5—холодильник).

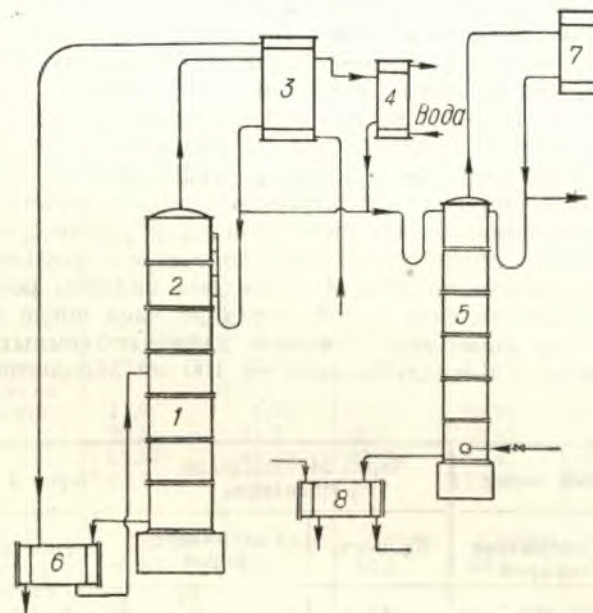


Рис. 3. Схема трехколонного аппарата для перегонки рома
(1—бражная колонна; 2—ректификационная колонна; 3—дефлегматор; 4—конденсатор; 5—альдегидная колонна; 6—барданной подогреватель; 7—дефлегматор альдегидной колонны; 8—холодильник рома-сырца).

исходит следующим образом. Бражка из бродильных чанов перекачивается насосом через дефлегматор 3 и бардяной подогреватель 6 на питательную тарелку бражной колонны. Дефлегматор 3 охлаждается поступающей на перегонку бражкой. Конденсатор 4 охлаждается водой. Полностью сконденсированные пары образуют раствор крепостью, примерно, 70% спирта по объему. Этот полупродукт поступает на альдегидную колонку 5, имеющую дефлегматор 7. Назначение этой колонки заключается в отборе головных продуктов из рома-сырца. Готовый ром-сырец отбирается снизу этой колонны и после охлаждения в холодильнике 8 идет на фонарь. Нижняя колонна 1 имеет шестнадцать колпачковых тарелок, верхняя колонна 2 — восемь таких же тарелок; диаметр этих колонн 0,9 м. Колонны 1 и 5 питаются открытым паром.

Таким образом и вопрос перегонки рома не разрешен заграничной практикой. Разнообразие применяемых аппаратов свидетельствует об отсутствии достаточно точных представлений о движении в колонне примесей рома. Наиболее совершенный из применяемых аппаратов (трехколонный) не позволяет отбирать сивушные масла. Вопрос о рациональной перегонке рома, с целью сохранения аромата и вкуса и освобождения от вредных примесей, не разрешен.

ВЫДЕРЖКА И СОЗРЕВАНИЕ РОМА

Ром-сырец, идущий на получение легкого рома, нередко подвергается обработке прежде, чем быть залитым на выдерживание. Сырец подвергается фильтрации через песок и древесный уголь. Тяжелый ром-сырец, как правило, обработке адсорбентами не подвергается. Перед заливкой на выдержку ром-сырец подвергается разбавлению. Разбавление производится до такой крепости, чтобы в последующем выдержанный ром отвечал требуемому рому желательной крепости. Обычное разбавление производится до 42,5—45% спирта по объему. Если учесть, что при получении сырого рома последний имеет крепость иногда 85—90%, то разбавление получается весьма основательное. Рекомендуют производить разбавление постепенно теплой, аэрированной, дистиллированной водой или водным раствором спирта ректификата.

При разбавлении водой в сырце происходят весьма существенные химические изменения. В основном происходит процесс гидролиза эфиров сырца, причем процесс этот идет довольно длительно.

В нижеследующей таблице 4 приведены анализы рома-сырца, произведенные до разбавления водой, через 24 часа после разбавления и через три месяца выдержки. Крепость дана в объемных процентах, а содержание эфиров в миллиграммах на 100 мл абсолютного алкоголя.

Таблица 4

Неразбавленный сырец		Через 24 часа после разбавления		Через 3 мес. выдержки	
Крепость	Содержание эфиров	Крепость	Содержание эфиров	Крепость	Содержание эфиров
80	176	55	151	52,5	138
80	177	55	143	52	132
80	122	55	75	53	63
77,5	122	54	91	52	81
81,5	104	54	89	51,5	75
72,5	143	54	101	51,5	93

Количество эфиров, таким образом, продолжает уменьшаться в течение продолжительного времени после разбавления. Высказываются взгляды, что разбавление должно быть минимальным, однако для этого необходимо получать сырец весьма низкой крепости, что затруднит отбор хвостовых примесей. При получении тяжелого рома это, однако, вполне приемлемо. Считают, что процесс разбавления усугубляет недостатки запаха и вкуса. Для исправления этих недостатков рекомендуют фильтрацию через активированный уголь, но эта операция ведет к потере части ароматических веществ.

Из изложенного ясно, что процесс разбавления нежелателен. Поэтому при проведении перегонки следует производить отбор сырца при крепости его возможно более близкой к той, в которой он будет выдерживаться. Выдержка рома-сырца производится в дубовых обожженных изнутри бочках как новых, так и в оборотных. Продолжительность выдержки весьма различна. Для различных сортов рома она колеблется от нескольких месяцев до многих лет.

Процессы, происходящие в роме, весьма разнообразны и находятся в зависимости от многих факторов. К этим факторам относятся: размер и материал бочек, крепость залитого на выдержку сырца, состав его примесей, характеристика окружающего бочки воздуха (влажность, температура). Размеры бочек оказывают существенное влияние на интенсивность испарения через поры стенок. Замечено, что при испарении в первую очередь удаляются летучие кислоты сырца, имеющие малый молекулярный вес. Далее испаряется этиловый спирт и вода. Возрастающие кислотности в процессе хранения зависят в сильной степени от того, в новых или старых, бывших в употреблении, бочках хранится выдерживаемый ром.

Некоторое представление о процессах, происходящих при хранении, дает следующая таблица 5 анализов рома из меляссы в процессе хранения.

Таблица 5

Показатели	Неразбавленный ром-сырец	Разбавленный ром-сырец	Продолжительность хранения, в месяцах			
			3	6	9	12
1. Удельный вес	0,86865	0,92516	0,92641	0,92522	0,92586	0,92428
Алкоголь, в об. проц.	76,8	52,5	51,88	52,47	52,15	52,93
Общая кисл., в мг на 100 мл абс. спирта	11,9	8,70	62,40	73,70	150,70	174,40
Альдегиды	39,6	41,3	66,3	56,50	45,6	40,2
Эфиры	61,87	47,10	42,70	60,40	67,50	109,80
Высшие спирты	181,9	177,9	175,4	173,40	174,40	173,0
2. Удельный вес	0,85836	0,93017	0,93253	0,93309	0,95193	0,93683
Алкоголь, в об. проц.	80,35	50,0	48,8	48,5	45,91	46,5
Общая кисл., в мг на 100 мл абс. спирта	29,5	37,10	121,3	147,7	188,2	211,0
Альдегиды	68,3	72,2	52,0	58,7	74,3	82,4
Эфиры	100,8	92,0	86,5	83,5	128,6	153,3
Высшие спирты	192,4	182,9	176,6	175,0	165,7	167,8

В таблице 6 даны анализы рома, полученного из дефектованного и осветленного сока сахарного тростника.

Таблица 6

Показатели	Неразбавленный сырой ром	Разбавленный сырой ром	Срок хранения в месяцах			
			3	6	9	12
1. Удельный вес . .	0,85338	0,93335	0,93516	0,93471	0,93284	0,93359
Алкоголь, в об. проц.	82,09	48,26	47,40	47,64	48,63	48,24
Кислотность, в мг на 100 мл абс. спирта	12,7	17,6	81,00	125,14	187,90	222,2
Альдегиды	74,2	66,7	51,3	44,0	59,8	54,3
Эфиры	82,6	72,9	51,9	62,8	97,7	113,2
Высшие спирты . .	144,6	—	—	—	—	138,9
2. Удельный вес . .	0,85882	0,93205	0,93516	0,93675	0,93712	0,93605
Алкоголь, в об. проц.	80,17	49,04	47,4	46,15	46,35	46,93
Кислотность, в мг на 100 мл абс. спирта	5,3	4,9	42,6	58,7	107,2	125,9
Альдегиды	74,2	66,7	51,3	44,0	59,8	54,3
Эфиры	82,6	72,9	51,9	62,8	97,7	113,2
Высшие спирты . .	114,4	—	—	—	—	117,28

Таким образом, в течение первого года хранения как в роме, полученном из меляссы, так и в роме, полученном из сока сахарного тростника, происходят следующие изменения: значительно увеличивается кислотность, значительно меньше изменяется содержание эфиров; при этом в начале хранения количество эфиров уменьшается, а затем — увеличивается. В конце года содержание эфиров становится выше, чем в исходном неразбавленном сырье. Изменения в содержании алкоголя незначительно, также невелико изменение в содержании альдегидов и высших спиртов.

Кислотность рома по проведенным анализам менее для рома из сока, чем для рома из меляссы. Эффект, производимый разбавлением сырья, менее заметен для рома, произведенного из сока. Общее содержание эфиров для рома из сока менее, по имеющимся в литературе анализам, чем для рома из меляссы. При дальнейшем хранении рома происходит уменьшение содержания алкоголя, кислотность продолжает нарастать, возрастает содержание эфиров и альдегидов. Количество высших спиртов несколько падает. Эти изменения показаны в таблице 7.

Таблица 7

Показатели	Средний химический анализ					
	после 1 года хранения		после 2 лет хранения		после 3 лет хранения	
	ром из меляссы	ром из сока	ром из меляссы	ром из сока	ром из меляссы	ром из сока
Удельный вес	0,93241	0,93418	0,93251	0,93921	0,93493	0,94016
Алкоголь, в об. проц.	48,85	47,92	48,8	45,19	47,52	44,68
Общая кислотность .	208,41	121,49	312,49	212,71	323,62	236,65
Альдегиды	43,67	56,31	88,97	68,57	108,96	81,52
Эфиры	131,42	62,36	217,67	110,87	271,90	172,5
Высшие спирты . . .	150,16	149,8	143,8	142,2	117,56	122,73

Каких-либо объективных показателей для состояния зрелости рома не указывается. Состояние зрелости определяется только органолептически. Имеются, однако, попытки охарактеризовать зрелый ром коэффициентами, вычисляемыми по данным химического анализа. Эти коэффициенты представляют отношение количества различных по химическому характеру ингредиентов, например, эфиры: высшие спирты, эфиры: альдегиды, эфиры: летучие кислоты и т. п. Хотя такие показатели и могут служить вспомогательным средством для оценки продукта, но едва ли им можно придавать слишком большое значение в оценке качества рома.

Имеются указания, что процесс созревания рома из сока происходит медленней, чем рома из меляссы. Однако, данных количественного характера по этому вопросу нет. Некоторые специалисты по рому утверждают, что вкус молодого рома выше, чем вкус зрелого рома, и что выдержка улучшает аромат, но ухудшает вкус.

Для исправления вкуса и букета применяются разнообразные ароматические и вкусовые вещества. Среди этих веществ можно отметить: а) различные вина, особенно типа Muscateles и Malagos, черносливовые вина и др., б) алкогольные фруктовые экстракты: фиговые, абрикосовые, черносливовые, персиковые и др., в) натуральные и искусственные эфирные масла: гвоздичное масло, ваниль, масло горьких миндалей, г) различные сахара и сахаросодержащие продукты: сахароза, глюкоза, сок тростникового сахара, мальтозный сироп, мед и т. д.

Отсутствие какой-либо стандартизации открывает широкую дорогу к фальсификации рома. Поэтому, наряду с натуральным ромом, на капиталистическом рынке существует значительное количество суррогатов, созданных на основе спирта-ректификата.

Вопрос старения рома, как это ясно из изложенного, также находится в первоначальной стадии изучения и нуждается в основательной научной разработке.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Ознакомление с состоянием технологии производства рома за границей убеждает в том, что это старейшее производство не разработано и большинство вопросов технологии не имеет научного освещения. Советским исследователям предстоит проделать громадную работу для превращения этого ремесленного, кустарного производства в технологию, основанную на науке.

Предстоит большая работа создания заново технологии почти во всех ее основных вопросах. К этим вопросам нужно отнести:

1. Типизацию и стандартизацию продукта на основе как вкусовых и ароматических, так и гигиенических требований. При этом необходимо исходить из требований, предъявляемых как ликеро-водочной, так и кондитерской промышленности. Нужно полагать, что будет целесообразным установить не менее трех основных типов рома, начиная от легкого и кончая тяжелым.

2. Рациональный выбор сырья и методов его подготовки для получения разных сортов рома. Нужно признать совершенно неправильной практику заграничных заводов, подготавливающих к брожению среду одинаково для любого сорта рома.

3. Выбор типа брожения для каждого из типов рома. Подбор соответствующих штаммов дрожжей, обеспечивающих минимум содержания сивушных масел и максимум ромового масла. Решение вопроса о необходимости симбиотического брожения.

4. Выделение ромового масла в чистом виде, его анализ и получение синтетического масла.

5. Разработка системы перегонки, обеспечивающей сохранение аромата и уменьшения как головных, так и хвостовых примесей рома, вредных для здоровья потребителя.

6. Исследование процессов, протекающих при хранении, методов стимуляции созревания и оптимальных условий выдерживания.

Решение этих задач требует большой исследовательской работы, которая успешно начата Институтом сухих субтропиков и Центральной научно-исследовательской лабораторией ликеро-водочной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков. Производственное освоение сахарного тростника, Спиртовая промышленность, № 5, 1940.
2. Осминников Н., Кизбургская Ф., Филимонова Е. Получение натурального рома из советского сахарного тростника, Спиртовая промышленность, № 11, 1939.
3. Rafael Arroyo. Studies on Rum. Research Bulletin № 5. University of Puerto-Rico, 1945.
4. Rafael Arroyo. Manufactura de Ron., Universidad de Perto Rico, 1938.
5. Peter Valaer. Foreign and domestic Rum, Ind. and Eng. Chemistry, September, 1937.
6. American Wine and Liquor Journal, № 4, 7, 1937.
7. Micko K. Über die Untersuchung des Jamaika und Kunst-Rums, Z. für Untersuchung der Nahrungs-und Genußmittel, B. 16, H. 8, S. 28, 1908.

(Получена редакцией 27 февраля 1952 г.)

Доц. РОЙТЕР И. М.,
кандидат технических наук

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ВОДНО-СПИРТОВЫХ СМЕСЕЙ

(Кафедра технологии броидильных производств)

При выполнении тепловых и продуктовых расчетов перегонных и ректификационных аппаратов спиртовых заводов приходится применять физические константы водно-спиртовых смесей: удельный вес, скрытую теплоту испарения, теплоемкость, вязкость и др.

Имеющиеся в литературе таблицы значений физических констант водно-спиртовых смесей составлены с большими интервалами, через один или несколько процентов крепости, через несколько градусов температуры и т. п. Поэтому для определения той или иной величины для промежуточного значения крепости, температуры или давления необходимо интерполирование.

Кроме неудобства и кропотливости аналитического интерполирования между двумя числовыми величинами, этот метод является недостаточно точным, так как интерполяция производится по способу среднего арифметического, в то время как изменение физических констант идет не по закону прямой, а по какой-то определенной кривой.

Особенно неудобно и сложно находить значения физических констант путем интерполяции ввиду того, что они, как правило, имеют одновременно двойную зависимость, от крепости спирта и от температуры или давления. В таком случае приходится производить интерполяцию в два приема, сначала по одной переменной, например, по крепости для двух ближайших значений температуры, а затем между полученными данными по второй переменной — температуре. Получаемые при этом результаты еще менее точны, так как интерполяция по обеим переменным осуществляется по закону прямой.

Этот способ определения физических констант водно-спиртовых смесей особенно затрудняет работу, когда их приходится устанавливать для большого количества точек, например, при проектировании, решении различных задач и, в особенности, при обработке экспериментальных данных в научно-исследовательских работах.

Мы поставили перед собой задачу составить графики для непосредственного определения основных физических констант водно-спиртовых смесей, дающие возможность с достаточной точностью и быстро устанавливать константы, не прибегая к вычислениям. Для этой цели использованы имеющиеся в литературе данные различных авторов, требовавшие обобщения. Особенно это касалось температур кипения водно-спиртовых смесей и удельного веса насыщенных паров при разном давлении, а также теплопроводности водно-спиртовых растворов при разной температуре. Графическая обработка позволила устранить некоторые неточ-

ности табличных данных, полученных, как известно, методами аналитической интерполяции.

Графики составлены для диапазона величин, с которыми приходится сталкиваться при расчете перегонных и ректификационных аппаратов спиртового производства, а в особенности дефлегматоров и холодильников этих аппаратов. Они будут полезны не только для проектных организаций и экспериментаторов, но также смогут быть использованы для учебных целей при решении различных задач по курсам процессов и аппаратов и оборудования пищевых производств.

Необходимо также отметить, что приведенные графики наглядно показывают характер изменения основных физических констант водно-спиртовых смесей в зависимости от содержания спирта, температуры и давления, что также важно для учебного процесса.

Температура кипения и теплота парообразования

Для построения кривых изменения температур кипения и теплоты парообразования водно-спиртовых смесей были использованы данные, приведенные Стабниковым В. Н. [4] и Мариейе Ш. [3], которые помещены в таблице 1.

Таблица 1

Температура кипения и теплота испарения водно-спиртовых смесей (в град. и ккал/кг)

Содержание спирта, в проц. об.	Давление в 1 ата		Содержание спирта, в проц. вес.	Давление в 1,25 ата		Давление в 1,50 ата	
	Температура кипения, в град.	Теплота парообразования, в ккал/кг		Температура кипения, в град.	Теплота парообразования, в ккал/кг	Температура кипения, в град.	Теплота парообразования, в ккал/кг
0	100 ¹	536,5	0	106,3	532	111,4	528
10	92,63	510,1	10	100,6	497	105,8	493
20	88,38	483,2	20	94,7	465	100,0	462
30	85,66	455,6	30	91,2	434	96,5	428
40	84,08	427,2	40	89,5	400	94,3	397
50	82,81	397,3	50	88,0	369	92,8	367
60	81,71	365,6	60	87,0	336	91,9	333
70	80,80	331,9	70	86,1	304	91,1	302
75	80,35	314,0	75	85,6	287	90,7	285
80	79,90	295,5	80	85,3	272	90,4	270
85	79,49	276,1	85	85,0	256	90,0	254
90	79,10	255,4	90	84,8	241	89,7	237
95	78,35	233,7	95	84,4	224	89,3	231
100	78,35	209,0	100	84,2	208	89,0	207

Исходя из необходимости соблюдения требуемой точности, составлены два графика: для крепостей водно-спиртовой смеси от 0 до 60% об. (рис. 1) и для крепостей от 60 до 100% об. (рис. 2).

¹ По таблицам Вукаловича М. П. данные для воды несколько отличаются от приведенных, но ввиду отсутствия соответствующих данных для водно-спиртовых смесей мы пользовались приведенной таблицей.

Данные таблицы соответствуют разной размерности содержания спирта. Для нормального давления они отнесены к объемным процентам крепости, а данные для давления выше нормального — к весовым процентам.

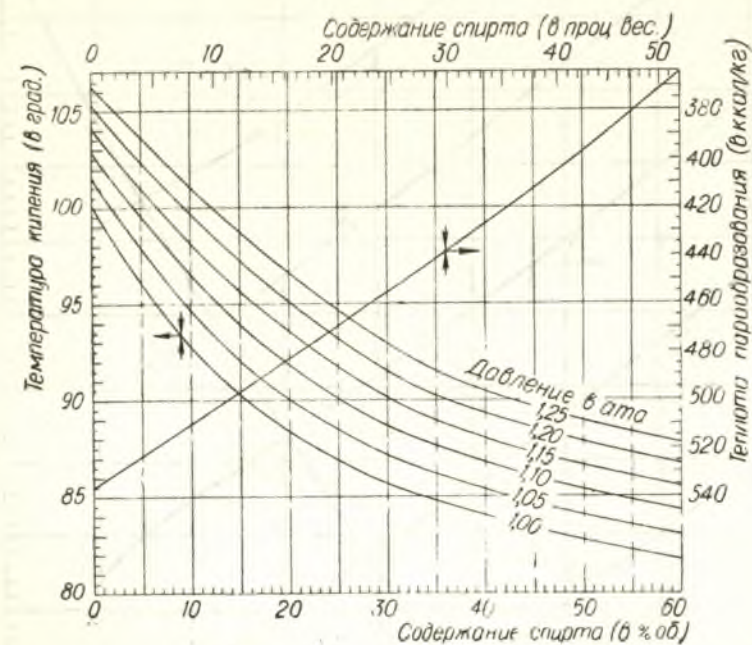


Рис. 1. Температура кипения и теплота парообразования водно-спиртовых смесей крепостью до 60% объема.

Графики построены так, чтобы можно было получить необходимые данные по объемным и по весовым процентам содержания спирта в смеси. Для этого на нижней горизонтальной отложена крепость смеси в объемных процентах, а на верхней — соответствующие им весовые проценты.

Порядок нахождения требуемых величин показан на рисунках стрелками.

Из таблицы 1 видно, что теплота парообразования в пределах давлений, наблюдаемых в аппаратах спиртового производства, изменяется незначительно, что практического значения для расчетов не имеет, поэтому на графиках построена кривая теплоты парообразования только для нормального давления. Что касается температур кипения, то на графике построены кривые для давлений от 1 до 1,25 ата.

Полученные кривые показывают, что температура кипения более существенно изменяется при изменении давления, а следовательно, одновременно с этим изменяются и другие физические константы. Отсюда следует сделать вывод о том, что метод проведения тепловых расчетов, применяющийся в настоящее время, по которому все вычисления производятся по температуре кипения при нормальном давлении без учета того давления, которое имеется в аппарате, требует пересмотра.

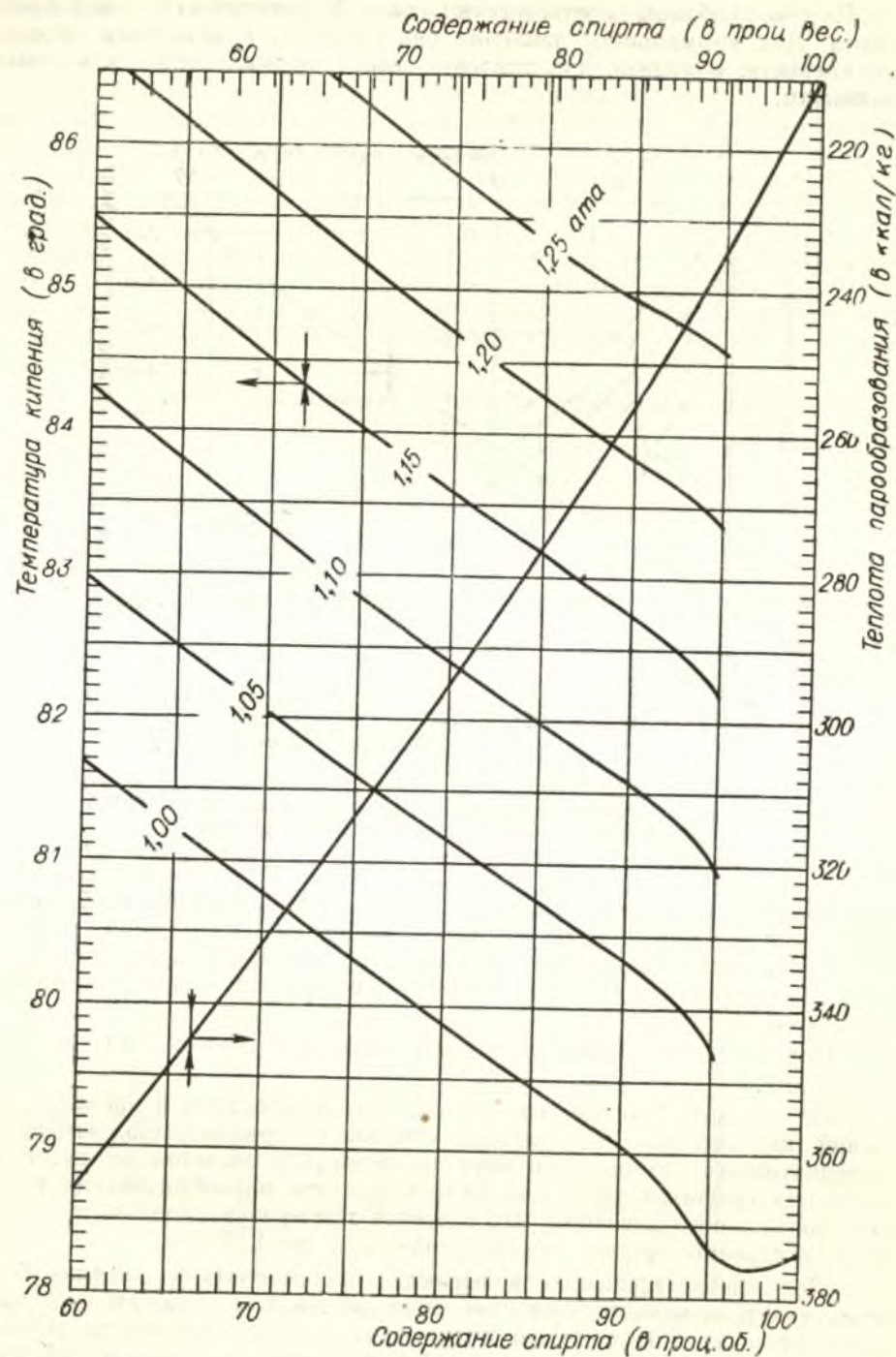


Рис. 2. Температура кипения и теплота парообразования водно-спиртовых смесей крепостью выше 60% объема.

Удельный вес

Кривая удельного веса жидких водно-спиртовых смесей d_{20}^{20} град (рис. 3) построена по данным, опубликованным Фертманом Г. И. [6], которые приведены в таблице 2.

Таблица 2

Удельный вес водно-спиртовых растворов

Содержание спирта, в проц. об.	Удельный вес, в кг/л	Содержание спирта, в проц. об.	Удельный вес, в кг/л
0	1,0000	55	0,9217
5	0,9928	60	0,9108
10	0,9865	65	0,8992
15	0,9807	70	0,8871
20	0,9753	75	0,8743
25	0,9698	80	0,8608
30	0,9638	85	0,8465
35	0,9573	90	0,8301
40	0,9497	95	0,8129
45	0,9412	97	0,8048
50	0,9318	100	0,7907

Кривые удельного веса насыщенных водно-спиртовых паров построены для давления в 1 и 1,1 *ата* по уточненным нами данным Кирова А. А. [1]. Удельные веса насыщенных паров для давления в 1,05 *ата*, имеющего место в дефлегматорах, и 1,2 *ата*, наблюдающегося в колоннах перегонных и ректификационных аппаратов, вычислены нами по формуле:

$$\gamma = \frac{P}{RT},$$

где:

γ — удельный вес пара, в $\text{кг}/\text{м}^3$,

P — давление, в $\text{кг}/\text{м}^2$,

T — температура кипения смеси, в $^{\circ}\text{K}$,

R — газовая константа, отнесенная к 1 кг пара, в $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{град}$.

Газовая константа вычислялась как среднее между константой для водяных и спиртовых паров пропорционально весовому содержанию в смеси воды и спирта. Для чистой воды и спирта газовая константа определялась из выражения:

$$R = \frac{847}{M},$$

где M — молекулярный вес воды или спирта.

Все данные сведены в таблицу 3.

Этот график, как и все остальные, построен как предыдущие, и позволяет получать необходимые данные по объемным и весовым процентам спирта в смеси.

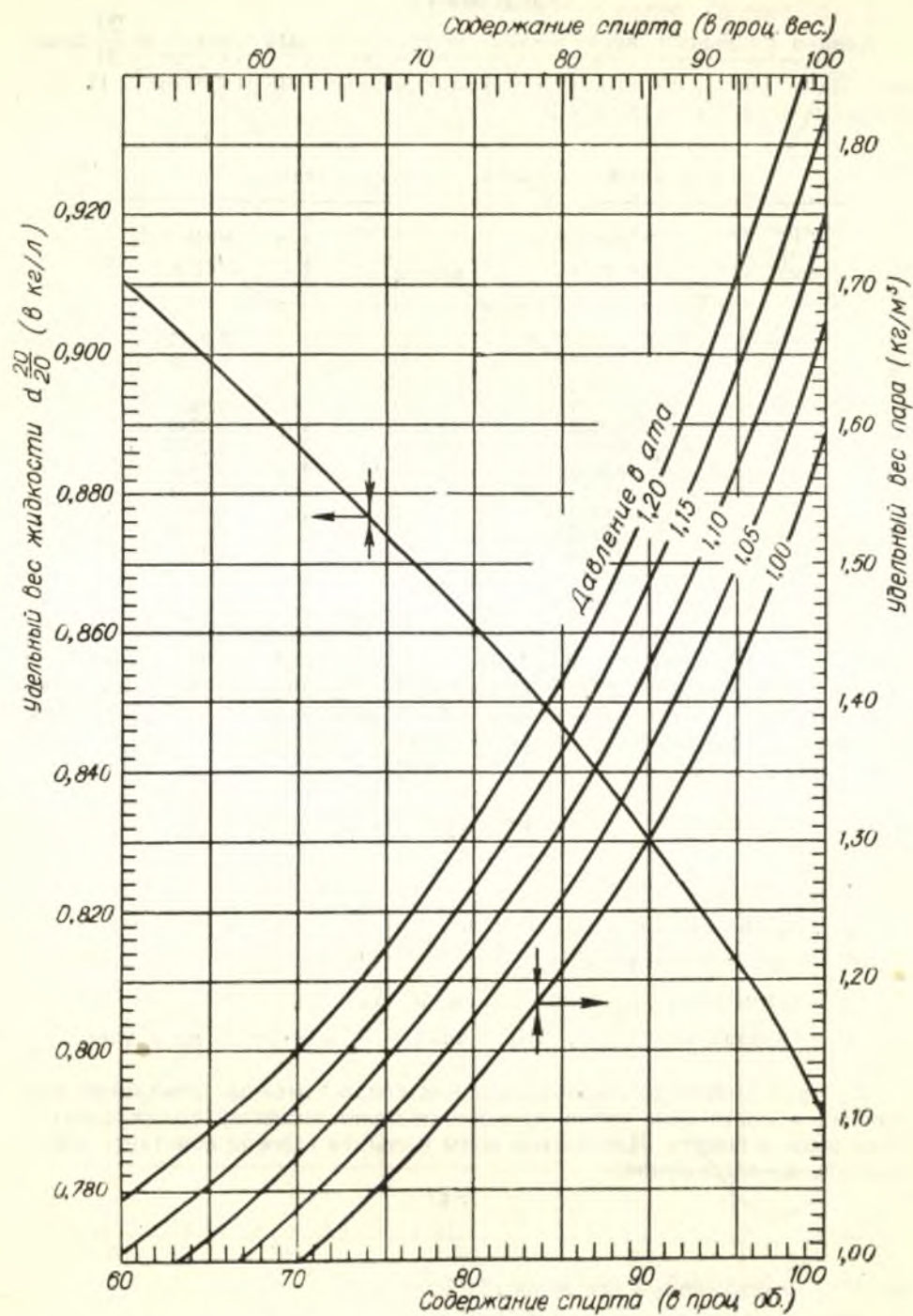


Рис. 3. Удельный вес жидкости и насыщенного пара водно-спиртовых смесей.

Таблица 3

Удельный вес водно-спиртовых паров (в кг/м³)

Содержание спирта, в проц. вес.	Давление в атм			
	1	1,05	1,1	1,2
0	0,589	0,618	0,638	0,700
5	0,620	0,644	0,670	0,725
10	0,643	0,668	0,693	0,755
15	0,667	0,691	0,715	0,780
20	0,694	0,716	0,742	0,805
25	0,722	0,745	0,768	0,837
30	0,750	0,777	0,799	0,870
35	0,785	0,808	0,833	0,904
40	0,817	0,844	0,870	0,941
45	0,854	0,881	0,909	0,984
50	0,887	0,920	0,950	1,025
55	0,933	0,965	0,999	1,073
60	0,976	1,015	1,050	1,125
65	1,025	1,067	1,109	1,190
70	1,085	1,125	1,176	1,258
75	1,145	1,196	1,247	1,340
80	1,214	1,269	1,326	1,430
85	1,295	1,354	1,418	1,535
90	1,380	1,448	1,520	1,650
95	1,480	1,557	1,632	1,775
100	1,598	1,675	1,750	1,910

Вязкость

Кривые вязкости составлены по данным Справочника физико-химических величин «Технической Энциклопедии» [5], приведенным в таблице 4.

Таблица 4

Вязкость водно-спиртовых растворов (в сантипуазах)

Крепость спирта, в проц. вес.	Температура в градусах								
	0	10	20	25	30	40	50	60	70
10	3,215	2,162	1,548	1,328	1,153	0,896	0,725	0,602	0,509
20	5,275	3,235	2,168	1,808	1,539	1,144	0,896	0,728	0,606
30	6,900	4,095	2,670	2,203	1,849	1,353	1,038	0,826	0,677
40	7,150	4,355	2,867	2,371	1,941	1,455	1,116	0,887	0,724
45	7,010	4,310	2,867	2,387	2,007	1,478	1,138	0,902	0,736
50	6,625	4,174	2,832	2,368	2,001	1,475	1,136	0,904	0,739
60	5,715	3,787	2,642	2,232	1,906	1,426	1,109	0,887	0,727
70	4,720	3,268	2,369	2,025	1,744	1,328	1,044	0,841	0,696
80	3,648	3,663	1,998	1,738	1,519	1,181	0,950	0,778	0,648
90	2,694	2,048	1,601	1,422	1,270	1,022	0,835	0,695	0,589
100	1,776	1,490	1,221	1,101	0,997	0,824	0,695	0,590	0,506

Вязкость является наиболее употребительной константой и применяется в тепловых и гидродинамических расчетах. Для обеспечения необходимой точности при ее определении составлены три графика.

На рис. 4 приведены кривые для крепостей спирта от 0 до 60% об. и температур от 10 до 70°. Для нанесения в этом графике точек для воды использованы данные, приведенные Кировым А. А. [2], которые помещены в таблицу 5.

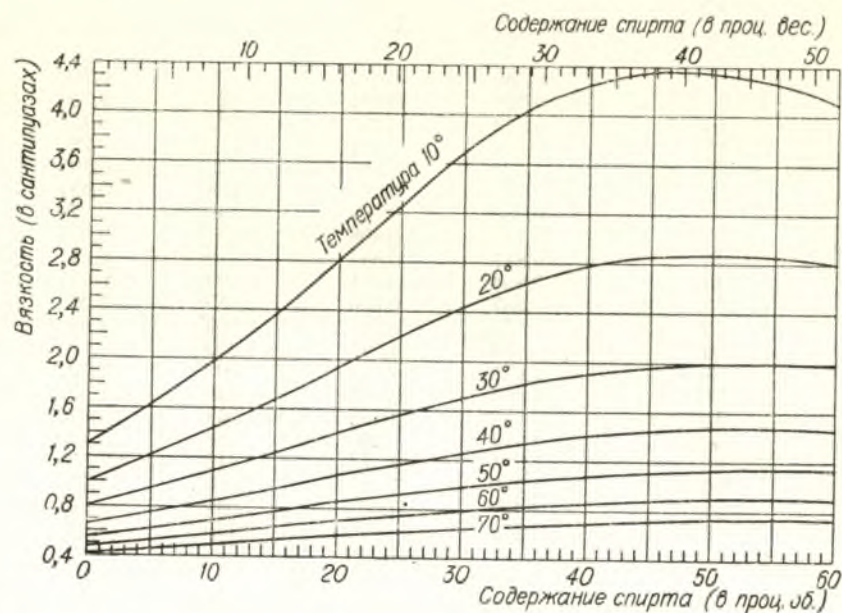


Рис. 4. Вязкость водно-спиртовых смесей крепостью до 60% объема.

Таблица 5

Вязкость воды при различной температуре

Температура, в град.	Вязкость, в сантипуазах	Температура, в град.	Вязкость, в сантипуазах
0	1,792	40	0,656
10	1,308	50	0,549
20	1,005	60	0,469
30	0,801	70	0,406

Для теплотехнических расчетов, в которых требуется большая точность, на рис. 5 изображены кривые для крепостей от 60 до 100% об. и температур от 10 до 50° (для расчета холодильников), а на рис. 6 для тех же крепостей и температур от 50° и выше (для расчета дефлегматоров).

Так как для расчета дефлегматоров и холодильников необходимы также данные о вязкости при температурах, близких к температуре кипения водно-спиртовых смесей, то данные таблицы экстраполированы нами до 80° (эти кривые показаны пунктиром).

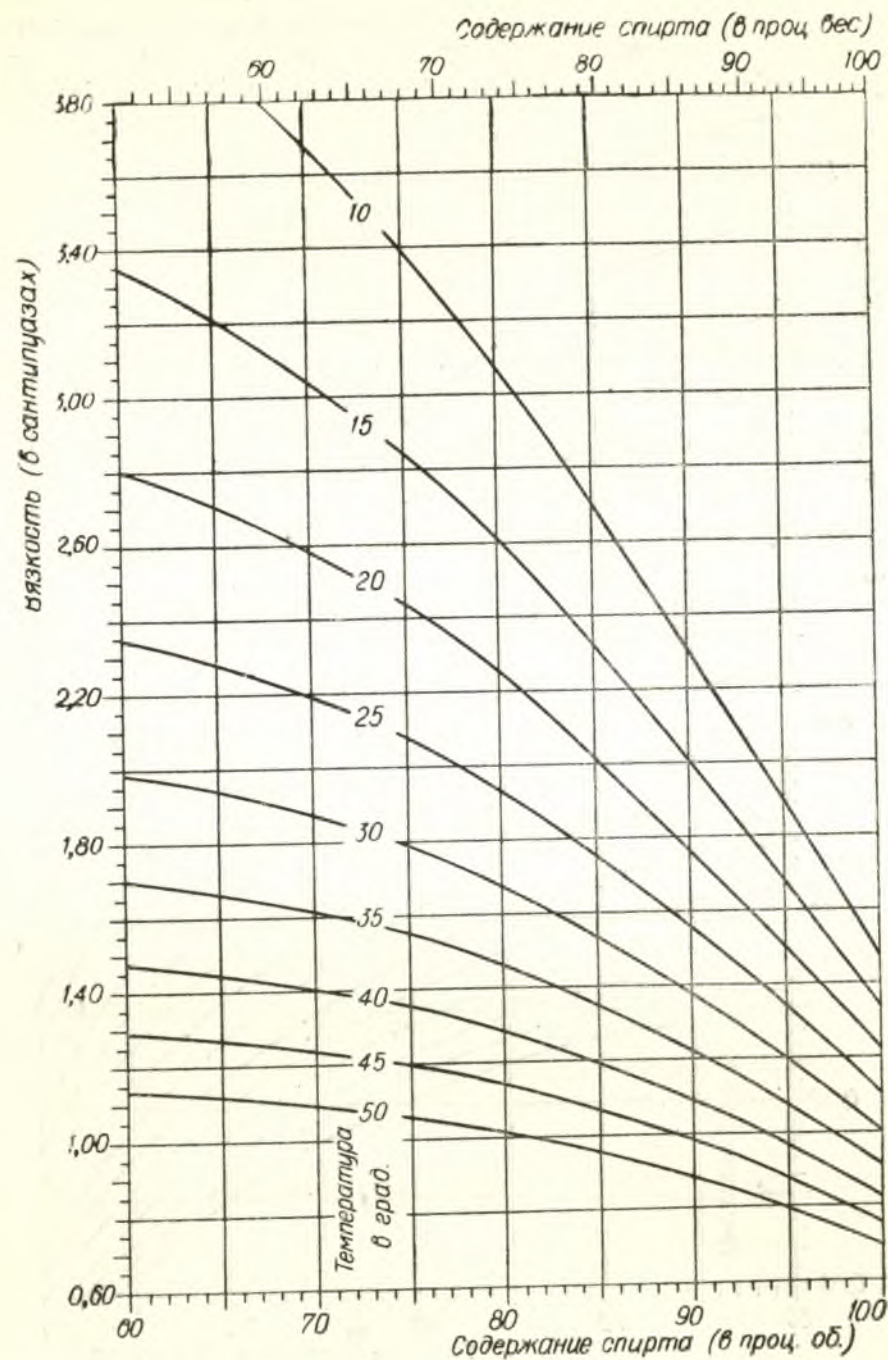


Рис. 5. Вязкость водно-спиртовых смесей крепостью выше 60% объема при температурах до 50°.

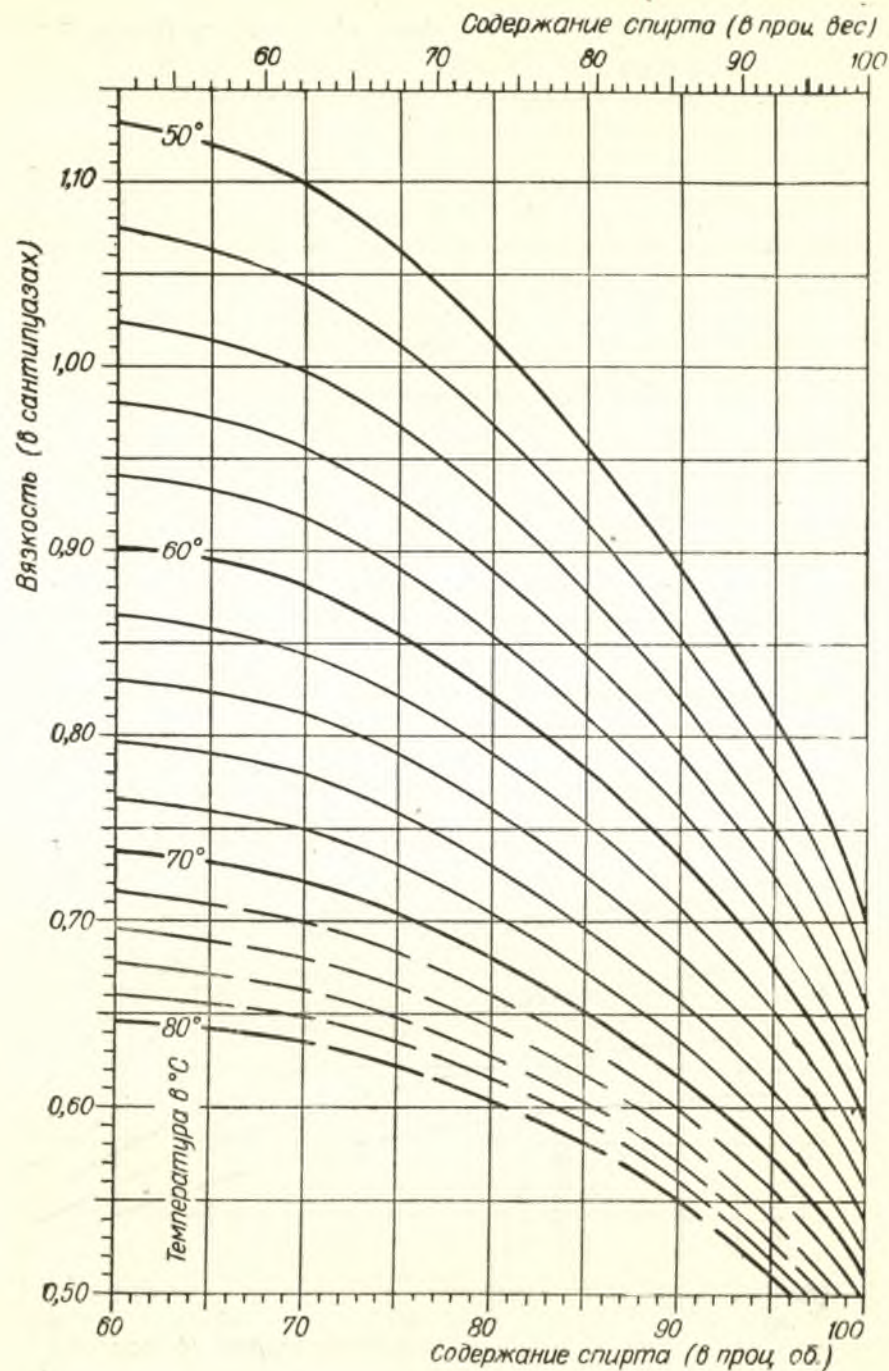


Рис. 6. Вязкость водно-спиртовых смесей выше 60% объемн. при температурах выше 50°.

Теплоемкость

Существуют различные формулы для определения теплоемкости водно-спиртовых растворов. В основу построения кривых, приведенных на рис. 7, положены формулы, рекомендуемые Кировым А. А. [2] и Стабниковым В. Н. [4], которые приведены в таблице 6.

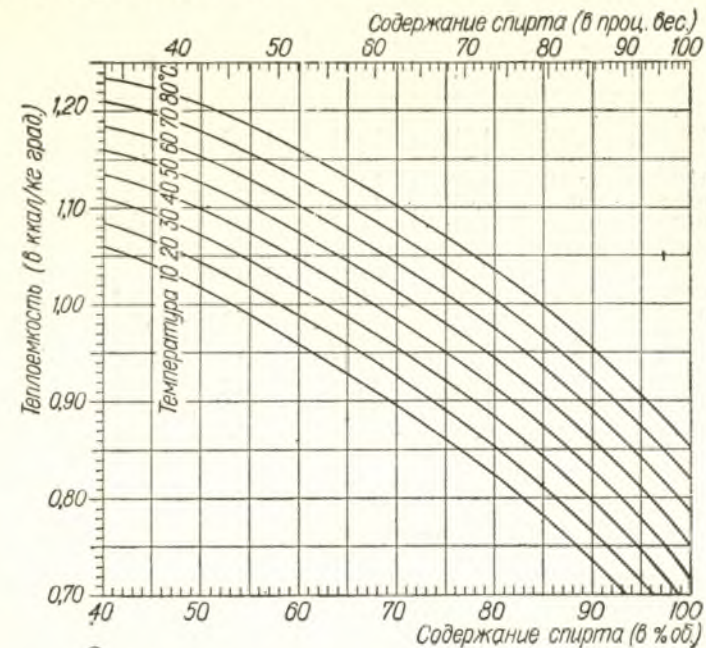


Рис. 7. Теплоемкость водно-спиртовых смесей.

Таблица 6

Формулы для определения теплоемкости водно-спиртовых растворов
(в ккал/кг. град.)

Содержание спирта, в проц. об.	Теплоемкость	Содержание спирта, в проц. об.	Теплоемкость
0	$1,000 + 0,00110 t$	55	$0,960 + 0,00275 t$
5	$1,040 + 0,00185 t$	60	$0,930 + 0,00285 t$
10	$1,060 + 0,00200 t$	65	$0,900 + 0,00290 t$
15	$1,065 + 0,00205 t$	70	$0,865 + 0,00295 t$
20	$1,065 + 0,00205 t$	75	$0,830 + 0,00300 t$
25	$1,060 + 0,00210 t$	80	$0,795 + 0,00305 t$
30	$1,055 + 0,00220 t$	85	$0,750 + 0,00310 t$
35	$1,045 + 0,00235 t$	90	$0,705 + 0,00310 t$
40	$1,035 + 0,00250 t$	95	$0,650 + 0,00320 t$
45	$1,015 + 0,00260 t$	97	$0,625 + 0,00325 t$
50	$0,990 + 0,00270 t$	100	$0,580 + 0,00340 t$

В этих формулах t обозначает температуру в градусах, при которой определяется теплоемкость, или полусумму температур, если теплоемкость определяется средней для диапазона между двумя температурами.

В таблице 7 приведены полученные по этим формулам числовые данные, служившие для построения кривых.

Таблица 7

Теплоемкость водно-спиртовых растворов (в ккал/кг·град)

Содержание спирта в проц. об.	Температура в градусах							
	10	20	30	40	50	60	70	80
40	1,060	1,085	1,110	1,135	1,160	1,185	1,210	1,235
45	1,041	1,067	1,093	1,119	1,145	1,171	1,197	1,223
50	1,017	1,044	1,071	1,098	1,125	1,152	1,179	1,206
55	0,988	1,015	1,043	1,070	1,097	1,125	1,152	1,180
60	0,959	0,987	1,016	1,044	1,072	1,101	1,130	1,158
65	0,929	0,958	0,987	1,016	1,045	1,074	1,103	1,132
70	0,895	0,924	0,954	0,983	1,012	1,042	1,072	1,101
75	0,860	0,890	0,920	0,950	0,980	1,010	1,040	1,070
80	0,826	0,856	0,887	0,917	0,948	0,978	1,009	1,039
85	0,781	0,812	0,843	0,874	0,905	0,936	0,967	0,988
90	0,736	0,767	0,798	0,829	0,860	0,891	0,922	0,953
95	0,682	0,714	0,746	0,778	0,810	0,842	0,874	0,906
97	0,658	0,690	0,723	0,755	0,788	0,820	0,853	0,885
100	0,611	0,648	0,682	0,716	0,750	0,784	0,818	0,852

Теплопроводность

По теплопроводности водно-спиртовых растворов в литературе имеются несистематизированные отрывочные данные различных авторов. Так как эти данные получены в разных условиях, то многие из них друг с другом не полностью согласуются.

Ввиду отсутствия проверенных опытных данных, полученных одним исследователем для всего диапазона крепостей и температур, Попов В. Д. на основании анализа имеющихся в литературе отдельных данных составил таблицу теплопроводности водно-спиртовых растворов для пределов температур от 0 до 80° (таблица 8).

Таблица 8

Теплопроводность водно-спиртовых растворов (в ккал/м·час·град)

Содержание спирта, в проц. вес.	Температура в градусах							
	0	10	20	30	40	50	60	80
5	—	0,432	0,486	0,501	0,511	0,522	0,536	—
10	0,434	0,450	0,461	0,476	0,486	0,497	0,508	0,517
20	0,385	0,407	0,416	0,428	0,436	0,443	0,454	0,498
30	0,345	0,367	0,374	0,382	0,385	0,393	0,396	0,458
40	0,300	0,331	0,335	0,335	0,339	0,342	0,346	0,415
50	0,252	0,295	0,295	0,299	0,299	0,299	0,299	0,364
60	0,216	0,263	0,263	0,259	0,259	0,259	0,256	0,328
70	0,185	0,234	0,230	0,227	0,223	0,220	0,216	0,298
80	0,164	0,209	0,205	0,198	0,195	0,187	0,184	0,275
90	0,137	0,187	0,180	0,173	0,166	0,159	0,151	0,250
100	0,160	0,165	0,155	0,148	0,137	0,130	0,119	0,150

Более поздние данные, сообщаемые Варгафтиком Н. Б. [7 и 8] для чистого этилового спирта, незначительно отличаются от данных этой таблицы.

На основании приведенных данных составлен график теплопроводности водно-спиртовых растворов для объемных и весовых процентов спирта в смеси (рис. 8). Для объемных процентов кривые нанесены сплошной линией, а для весовых процентов прерывистой.

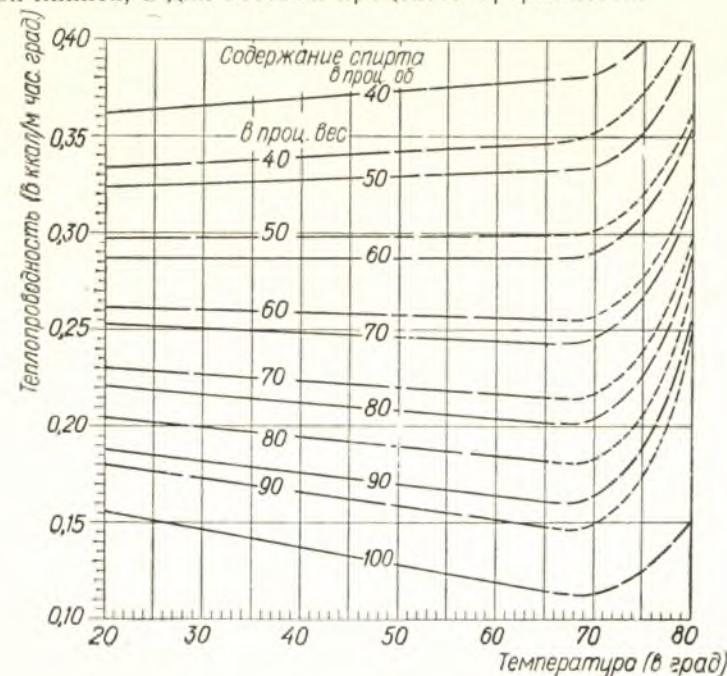


Рис. 8. Теплопроводность водно-спиртовых смесей.

График показывает, что в пределах температур от 10 до 60° изменение теплопроводности может быть выражено с достаточной точностью прямой. От 60 до 80° изменение теплопроводности происходит по кривым. Так как данными для водно-спиртовых смесей при температуре в 70° мы не располагаем, то кривые на этом участке поданы пунктиром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киров А. А. Техническая аппаратура спиртового производства, 1937.
2. Киров А. А. Аппараты для ректификации спирта, 1940.
3. Марийев Ш. Перегонка и ректификация в спиртовой промышленности, 1934.
4. Стабников В. Н., Харин С. Е. Теоретические основы перегонки и ректификации спирта, 1951.
5. Техническая энциклопедия. Справочник физико-химических величин, т. X.
6. Фертман Г. И. Справочные таблицы по контролю спиртового производства, 1940.
7. Варгафтик Н. Б. Теплопроводность жидкостей, «Известия ВТИ», № 8, 1949.
8. Михеев М. А. Основы теплопередачи, 1949.

(Получена редакцией 14 апреля 1952 г.)

Доц. ЛИТВАК И. М.,
кандидат технических наук

О ПРИМЕНЕНИИ КИСЛОТНОГО СПОСОБА ОСАХАРИВАНИЯ КРАХМАЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ СПИРТА

(Кафедра технологии сахаристых веществ)

Сообщение первое

Внедрение полунепрерывной технологической схемы производства спирта из крахмалсодержащего сырья, разработанной лауреатами Сталинской премии Малченко А. Л. и Чистяковым И. П. и ВНИИСПом, улучшило технику производства и увеличило выход спирта.

Дальшее усовершенствование технологии и оборудования должно обеспечить создание полностью непрерывной технологической схемы производства спирта и уменьшение потерь в процессе переработки сырья на спирт.

Современная технология производства спирта из крахмалистого сырья имеет существенные недостатки, которые определяются, в первую очередь, относительно большими потерями и периодичностью важных производственных процессов. Основная причина недостатков, присущих современной технологии производства спирта из крахмалистого сырья, заключается, по нашему мнению, в применении ферментативного способа осахаривания крахмала с помощью солода.

Недостатки, обусловленные применением солода для осахаривания крахмала, заключаются, главным образом, в следующем:

1. Процесс приготовления солода является весьма трудоемким (на многих заводах этот процесс пока не механизирован) и сопряжен с потерей 16—18% крахмала по весу его в зерне, поступающем на производство солода.

2. Применение солода для осахаривания обуславливает значительные потери вследствие неполноты растворения крахмала и неполноты сбраживания конечных декстринов. Величина этих потерь достигает 6—7% крахмала по весу его в сырье.

3. Солод является главным источником инфекции, которая нарушает нормальную работу спиртового завода и приводит часто к большим потерям.

4. Применение солода для осахаривания крахмала является основным препятствием на пути внедрения непрерывного сбраживания заторов вследствие трудности обеспечить необходимую стерильность среды.

Из приведенного следует, что изыскание более рационального способа осахаривания крахмала сырья может привести к усовершенствованию всей технологии производства спирта и снижению потерь.

ВНИИСП разработал способ замены солода амилолитическими препаратами, содержащими декстриназу в большем количестве, чем солод, что обеспечивает в процессе брожения более полное осахаривание конечных декстринов. ВНИИСП рекомендует применить плесневые грибы

Aspergillus как поверхностного, так и глубинного выращивания, которые обладают более богатой ферментативной системой. Однако в силу ряда причин этот способ пока не находит распространения в спиртовой промышленности.

Коренное усовершенствование технологии производства спирта из крахмалистого сырья представляется возможным путем замены ферментативного гидролиза кислотным. Указанное обстоятельство побудило нас заняться разработкой рациональной технологии производства спирта с применением кислотного гидролиза крахмала на базе современных знаний в области химии растительного сырья и теории гидролиза полисахаридов.

Вопрос о замене солода кислотой в производстве спирта из зерна неоднократно привлекал внимание исследователей. Основные преимущества кислотного гидролиза для производства спирта из размолотого зерна были указаны химиком Мельниковым Н. М. еще во второй половине прошлого века. Мельников [1] приводит описание способа осахаривания молотой кукурузы серной и соляной кислотой при нормальном и повышенном давлении.

Колани и Крюгер [2], Сатесс и др. занимались проблемой замены солода кислотой для осахаривания крахмала в молотом зерне. По данным этих исследователей, расход кислоты для гидролиза при нормальном давлении составил: серной кислоты крепостью 60° Вё — 6%, а соляной кислоты крепостью 22° Вё — 10% по весу кукурузы (что соответственно равно около 9% H_2SO_4 , или 6,2% HCl по весу крахмала в зерне). Продолжительность гидролиза при этом составила: при серной кислоте — 15 час., а при соляной кислоте — 8—9 час.

Излагая способ осахаривания ячменя, ржи, пшеницы и кукурузы кислотой, эти же авторы приводят следующие данные. Для гидролиза при давлении в 3 атм на 300 кг размолотого зерна вводили 600 л воды и 16 кг соляной кислоты; продолжительность гидролиза составляла 50 мин.

Описанные выше и более поздние попытки заменить солод кислотой в производстве спирта из зерна не нашли применения в промышленности, главным образом, вследствие большого расхода кислоты. По экономическим соображениям производство спирта путем кислотного гидролиза не представляло интереса для промышленности, несмотря на ряд технологических преимуществ этого способа. Данных о применении кислотного гидролиза картофеля для производства спирта в литературе найти нам не удалось.

Для того, чтобы сделать способ кислотного гидролиза экономически целесообразным для спиртовой промышленности, необходимо, в первую очередь, изыскать возможность коренного снижения расхода кислоты.

Экспериментальное и теоретическое исследование, выполненное нами на протяжении нескольких лет, имело своей целью изучение условий, необходимых для гидролиза картофеля, установление и устранение причин, обуславливающих большой расход кислоты, и разработку новой технологии производства спирта.

Картофель в технологическом и экономическом отношении является наиболее выгодным крахмалсодержащим сырьем для производства спирта. Экономическое преимущество картофеля как сырья для производства спирта определяется, в первую очередь, тем, что урожай сортового картофеля с единицы площади дает в 3—4 раза больше спирта, чем зерновые культуры [3].

РАЗВЕДОЧНЫЕ ОПЫТЫ

Первая серия опытов выполнена нами с целью изучения возможной полноты гидролиза измельченного картофеля соляной кислотой при разных давлениях.

В этих опытах, с одной стороны, изменялось количество кислоты и давление, а с другой стороны, выяснялось влияние предварительного разваривания картофельной кашки на полноту гидролиза крахмала и выход спирта. Параллельные пробы гидролизата каждого варианта подвергались исследованию, а другие парные пробы ставились на брожение. Средние результаты этих опытов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходный материал	Количество HCl , в проц. по весу крахмала	Давление, в атм	Состав гидролизата		Выход спирта, в мл на 100 г крахмала
			Доброрастворимость	Наличие декстринов по спиртовой пробе	
Картофельная кашка, не разваренная	1,0	2,5	2,65	(+)	—
	1,8	2,5	6,2	(+)	6,4
	4,0	5,0	13,4	(+)	не сбродило
	4,0	6,0	20,4	(+)	12,7
Картофельная кашка, разваренная при давлении 2,5 атм в течение 40 мин.	1,0	2,5	4,2	(+)	не сбродило
	1,8	2,5	11,2	(+)	13,7
Проба крахмала (контроль)	1,2	2,5	80,9	(—)	65,7

Результаты опытов показывают, что во всех испытанных вариантах картофель гидролизуются кислотой плохо, а выход спирта в 6—10 раз ниже, чем из крахмала, выделенного из картофеля способом бактериальной ферментации. Даже в тех вариантах опыта, где условия гидролиза были сравнительно жесткими (давление 5—6 атм и расход кислоты 4% HCl по весу крахмала), выход сброживаемых веществ и спирта в несколько раз был ниже, чем в том случае, когда гидролизу подвергался крахмал при 2,5 атм и при 1,2% HCl .

Прежде чем перейти к изучению причин, обуславливающих столь неудовлетворительный гидролиз картофельной кашки, мы решили выяснить, какое количество серной и соляной кислоты окажется достаточным для гидролиза крахмала в картофеле и возможно ли довести этот гидролиз до конца.

С указанной целью были проведены две серии опытов с осахариванием картофельной кашки серной и соляной кислотой при давлении 2,5 атм. Пробы картофельной кашки после разжижения подвергались гидролизу в течение 60 мин. Расход кислоты изменялся от 5 до 22% H_2SO_4 и от 1,2 до 11% HCl по весу крахмала, содержащегося в кашке. Результаты этих опытов, представленные на рис 1, дают основание для следующих выводов.

1. С увеличением количества кислоты до 14% H_2SO_4 , или до 7—8% HCl по весу крахмала, выход глюкозы и, следовательно, доброкачественность гидролизата повышаются. Дальнейшее увеличение расхода кислоты до 22% H_2SO_4 , или до 11% HCl не изменяют доброкачественности гидролизата.

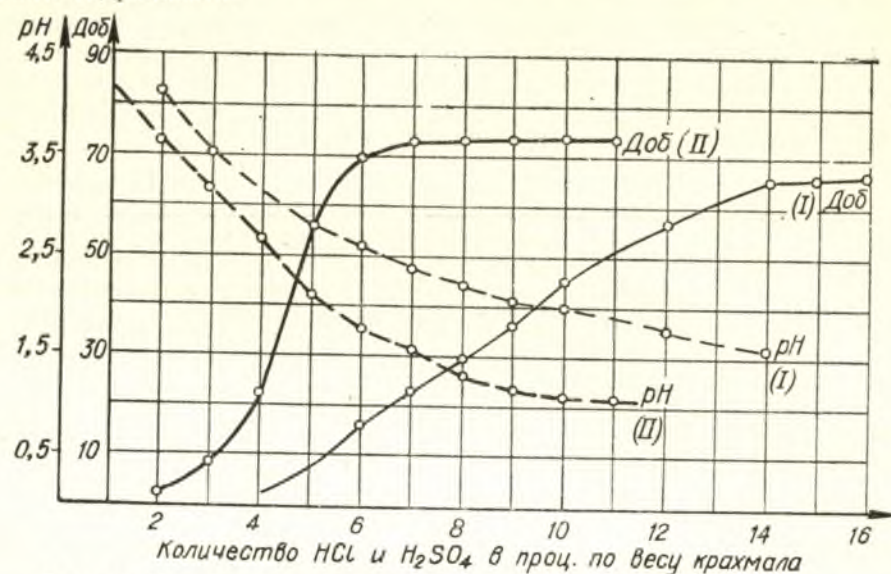


Рис. 1. Изменения доброкачественности и pH гидролизата при гидролизе картофеля серной (I) и соляной кислотой (II).

2. Максимально достигнутая доброкачественность гидролизата оказалась равной при серной кислоте 65,8% и при соляной кислоте — 72,3%, что соответствует выходу редуцирующих веществ в 78—88% от теоретически возможного.

Установленное опытным путем количество кислоты, необходимое для гидролиза крахмала в измельченном картофеле, настолько велико, что в этом случае замена ферментативного гидролиза была бы нецелесообразна, тем более, что и выход сбраживаемых веществ недостаточен.

ПРИЧИНЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ БОЛЬШОЙ РАСХОД КИСЛОТЫ ПРИ ГИДРОЛИЗЕ КРАХМАЛА В КАРТОФЕЛЕ

Дальнейшее исследование было направлено на изучение причин, обуславливающих большой расход кислоты при гидролизе крахмала картофеля. Опытным путем было установлено, что вещества, связывающие кислоту и снижающие ее каталитическую активность в реакции гидролиза, относятся к воднорастворимой части картофеля.

Прибавление соковой воды картофеля к раствору кислоты резко снижает концентрацию водородных ионов последней. Средние результаты опытов, в которых показано влияние растворимых веществ картофеля на pH раствора серной кислоты, представлены ниже.

К исходному раствору кислоты (2,2 pH) добавлены	pH смеси
Измельченный картофель (кашка)	4,0
Картофельная кашка без соковой воды	2,4
Соковая вода картофеля	3,5
Рафинированный крахмал (контроль)	2,35

Из приведенных данных следует, что:

а) измельченный картофель значительно повышает pH раствора кислоты (с 2,2 до 4,0);

б) после удаления воднорастворимых веществ картофельная кашка изменяет pH раствора кислоты почти в такой же степени, как крахмал (всего на 0,15—0,2);

в) соковая вода картофеля значительно понижает концентрацию водородных ионов раствора кислоты (pH повышается на 1,3).

Следующие опыты были выполнены с целью изучения влияния количества добавленной картофельной кашки и соковой воды картофеля на pH исходного раствора кислоты. В качестве контроля служил образец картофельного крахмала.

Средние результаты опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2

К исходному раствору кислоты (2,2 pH) добавлено	Количество добавленного материала, в граммах											
	1,25	2,5	3,75	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
pH смеси												
Картофельная кашка	—	—	—	2,58	—	3,0	—	3,55	4,0	4,6	4,85	5,12
Соковая вода картофеля	—	—	—	2,7	—	3,5	—	4,24	4,6	5,0	5,3	5,5
Крахмал (контроль)	2,4	2,42	2,44	2,45	2,45	2,5	2,57	—	—	—	—	—

Из данных, приведенных в таблице 2, видно, что с увеличением количества картофельной кашки и соковой воды картофеля pH смеси неуклонно и значительно повышается. Несколько иная картина наблюдается при добавлении возрастающих количеств крахмала к такому же раствору кислоты: pH смеси в этом случае изменяется весьма незначительно. Так, например, 12,5 г крахмала изменяет pH в такой же степени, как 5 г картофеля, содержащих около 0,9 г крахмала.

Следовательно, при попытке гидролизовать картофель кислотой, концентрация водородных ионов в смеси становится недостаточной. Кроме того, продукты реакции кислоты с некоторыми веществами картофеля, по видимому, понижают каталитическую активность кислоты в реакции гидролиза крахмала.

Для того, чтобы экспериментально убедиться в справедливости сделанного выше вывода и установить, при каком количестве кислоты может быть достигнуто pH смеси в пределах 1,8—2,2, было выполнено исследование, результаты которого представлены графически на рисунке 2.

Из полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением количества кислоты, добавленной к картофельной кашке, pH смеси понижается, достигая при 5% H_2SO_4 (по весу крахмала) значения 2,4. Примерно такое же значение pH смеси (2,5) достигается при добавлении 0,5% H_2SO_4 к промытой картофельной кашке. Следовательно, если принять во внимание только фактор концентрации

водородных ионов, то расход кислоты на гидролиз картофеля должен быть в 10 раз больше, чем для гидролиза картофельной кашки, из которой удалены все воднорастворимые вещества.

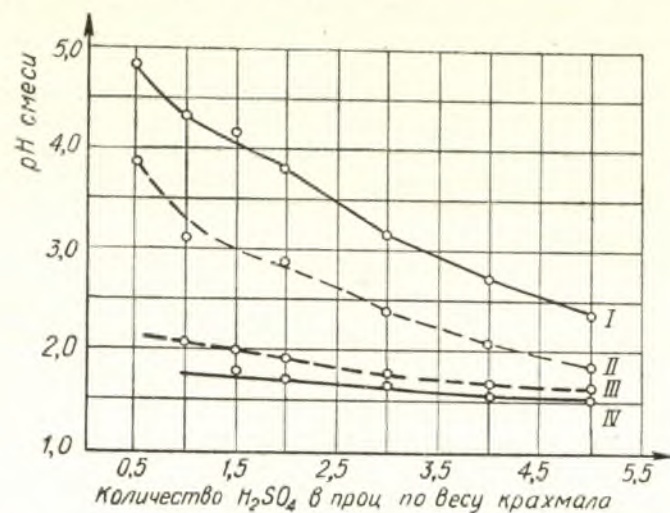


Рис. 2. Изменения pH смеси в зависимости от количества добавленной кислоты (I—картофельная кашка, II—картофельная кашка без 40% соковой воды, III—промытая кашка, IV—крахмал).

2. Картофельная кашка, из которой удалена только часть соковой воды (40%), связывает значительно меньше кислоты. Так, например, в этом случае pH, равное 2,4, достигается уже при 3% H₂SO₄ вместо 5% H₂SO₄ для картофеля, содержащего всю соковую воду.

3. Измельченный картофель, из которого практически удалены все воднорастворимые вещества, связывает незначительное количество кислоты, причем немного больше, чем чистый крахмал.

Однако, из приведенного не следует, что для гидролиза промытой картофельной кашки потребуется столько же кислоты, сколько для гидролиза чистого крахмала. Последующими опытами установлено, что расход кислоты в этом случае должен быть при прочих равных условиях в 1,5—2 раза больше, чем для гидролиза чистого крахмала.

Результаты опытов убедили нас в том, что вещества, связывающие кислоту при гидролизе картофеля и тормозящие эту реакцию, относятся к воднорастворимым. Однако, заключение о роли воднорастворимых веществ картофеля покоилось только на данных изменения pH смеси, т. е. на косвенных определениях.

Для того, чтобы проверить правильность вышеприведенных выводов, было выполнено исследование, целью которого было установить влияние воднорастворимых веществ картофеля на гидролиз крахмала. При этом были приняты следующие условия гидролиза: количество серной кислоты 2% по весу крахмала, давление 2 атм, продолжительность 60 мин.

Средние результаты нескольких опытов представлены в таблице 3. Полученные результаты не оставляют сомнения в том, что именно соковая вода картофеля, т. е. воднорастворимые вещества его и являются основной причиной, обуславливающей необходимость большего расхода кислоты на гидролиз картофеля. При добавлении этих веществ и при

Таблица 3

Исходный материал	Качество гидролизата				
	pH	сухие вещества, в проц.	редуцирующие вещества, в проц.	доброкачественность	наличие декстринов по спиртовой пробе
Крахмал (выделенный из картофеля биохимическим путем)	2,0	14,9	10,5	81,5	(—)
Тот же крахмал + соковая вода картофеля (в количестве, соответ. содержанию ее в картофеле)	3,7	15,6	0,83	5,5	(+)

прочих равных условиях гидролиза доброкачественность гидролизата (выход глюкозы), примерно, в 15 раз меньше.

К воднорастворимым веществам относится комплекс разнообразных составных частей картофеля. Дифференцированным исследованием мы стремились уточнить роль отдельных групп этих веществ в связывании кислоты и снижении каталитической активности последней в реакции гидролиза крахмала.

Растворимые белковые вещества. Для изучения роли растворимых белковых веществ, количество которых найдено равным около 76% от общего содержания белка в картофеле, был выполнен ряд опытов.

Выделение растворимых белков из соковой воды картофеля производилось способом термической коагуляции. При этом было учтено, что любой другой способ выделения белка потребовал бы ввода реактивов и это затемнило бы картину исследования.

Вначале изучалось влияние растворимых белков картофеля на изменение pH исходного раствора кислоты.

Средние результаты этих опытов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Исходный раствор кислоты	К 100 мл исходного раствора кислоты добавлены	pH смеси
Раствор серной кислоты pH 2,2 (100 мл)	Соковая вода картофеля $\frac{10}{20}$ мл	3,16
		4,41
	Соковая вода без белка $\frac{10}{20}$ мл	3,2
		4,41
	Сухой остаток соковой воды без белка—1 г Промытый белок, полученный из 35 мл соковой воды	4,35 2,4
Раствор соляной кислоты pH 2,15 (100 мл)	Соковая вода картофеля $\frac{10}{20}$ мл	3,04
		4,24
	Соковая вода картофеля без белка $\frac{10}{20}$ мл	3,08 4,26

Из данных, приведенных в таблице 4, следует, что соковая вода картофеля, из которой предварительно выделен белок, в такой же степени снижает концентрацию водородных ионов растворов серной и соляной кислоты, как и в присутствии белка.

Для того, чтобы уточнить влияние растворимых белковых веществ картофеля на процесс гидролиза крахмала, было выполнено исследование, результаты которого представлены в таблице 5.

Таблица 5

Исходный материал	Количество H ₂ SO ₄ , в проц. по весу чистого крахмала	Состав гидролизата				
		сухие вещества, в проц.	редуцирующие вещества, в проц.	доброкачественность	pH	наличие декстринов
Крахмал + 100 мл соковой воды картофеля . . .	2,0	15,6	0,97	6,2	4,0	(+)
Крахмал + 100 мл соковой воды картофеля без белка	2,0	13,8	1,29	9,3	3,8	(+)
Крахмал + промытый белок, полученный из 100 мл соковой воды	2,0	13,7	11,25	82,1	2,2	(-)
Крахмал (контроль) . .	2,0	14,8	12,3	83,1	2,0	(-)

Состав исходного крахмала: крахмала 71%, влаги — 16,7%, некрахмалистых веществ — 12,3, доброкачественность 85,7.

Результаты исследования с достаточной убедительностью показывают, что растворимые белковые вещества картофеля практически не влияют на процесс гидролиза крахмала.

Соковая вода картофеля в присутствии и в отсутствии белковых веществ почти в равной степени отрицательно влияет на процесс гидролиза крахмала и уменьшает выход сахара в 9—13 раз.

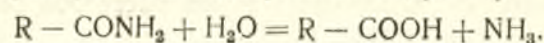
Следовательно, причины, обуславливающие большой расход кислоты на гидролиз картофеля и тормозящие этот процесс, вызываются *растворимыми небелковыми* веществами картофеля.

Однако, кроме белков, комплекс растворимых веществ картофеля включает множество других органических и неорганических соединений.

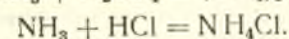
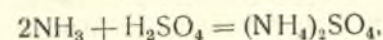
Рассмотрим кратко отношение других групп растворимых веществ картофеля к наблюдаемому явлению.

Небелковые азотистые вещества картофеля. Роль этой группы веществ в связывании кислоты и снижении каталитической активности ее, по нашему мнению, заключается в следующем: основная масса небелкового азота находится в картофеле в форме амидов. Содержание амидного азота составляет в среднем 0,118% (при максимуме в 0,219%) по весу картофеля, или около 96% к весу всей группы растворимых небелковых азотистых веществ.

В присутствии минеральных кислот (серной или соляной), служащих катализаторами, амиды подвергаются гидролизу:



Освободившийся аммиак связывает часть кислоты, предназначенной для гидролиза:



Расчеты показали, что по этой причине при гидролизе картофеля связывается около 2,3% H₂SO₄, или 1,7% HCl по весу крахмала в картофеле.

Кроме того, соли аммония, полученные в результате воздействия минеральной кислоты на амиды картофеля, снижают каталитическую активность кислоты в реакции гидролиза крахмала. Сернистый аммоний в присутствии серной кислоты влияет более заметно, чем хлористый аммоний в присутствии соляной кислоты. Такое предположение высказывается на основании результатов исследования, приведенного на графике (рис. 1), и по данным Шаркова В. И. [4].

Минеральные вещества картофеля. Исследование показало, что минеральные вещества картофеля и, главным образом, калиевые и натриевые соли органических кислот, взаимодействуют с минеральной кислотой, введенной для гидролиза, и связывают часть этой кислоты.

В результате реакции с солями калия, натрия и амидами часть серной или соляной кислоты замещается органическими кислотами, степень диссоциации и каталитическая активность которых незначительна. Кроме того, как уже указывалось выше, образовавшиеся соли с одноименным для минеральной кислоты анионом понижают каталитическую активность этой кислоты в реакции гидролиза крахмала.

Если исходить из среднего содержания золы в 1,09% по весу картофеля и из количества K₂O и Na₂O в золе в 63%, то количество кислоты, связывающиеся по этой причине, составят 3,96% H₂SO₄, или 2,87% HCl по весу крахмала в картофеле.

Для проверки вышеприведенного заключения нами выполнен следующий опыт. К нескольким пробам крахмала (по 50 г в каждой) были добавлены соли натрия в количествах, соответствующих среднему содержанию суммы K₂O и Na₂O в картофеле. Все пробы крахмала были разжижены и подвергнуты гидролизу серной кислотой в количестве 2% по весу чистого крахмала при давлении 2 атм. в течение 60 мин.¹

Средние результаты этих опытов представлены в таблице 6.

Таблица 6

Исходный материал	pH разжиженной массы	Качество гидролизата		
		pH	доброкачественность	наличие декстринов по спиртовой пробе
Крахмал + 3,3 г уксуснокислого натрия	4,7	4,7	14,3	(+)
Крахмал + 2,72 г щавелевокислого натрия	3,6	3,6	57,0	(+)
Крахмал + 3,5 г лимоннокислого натрия	4,2	4,2	18,6	(+)
Крахмал (контроль)	—	1,9	83,9	(-)

¹ В этих опытах были приняты условия, обеспечивающие хорошие результаты гидролиза крахмала, выделенного из картофеля биохимическим путем.

Результаты проведенных опытов подтверждают правильность вышеприведенных выводов: в присутствии органических солей натрия выход глюкозы уменьшился в 2—6 раз. Относительно больший выход глюкозы в присутствии щавелевокислого натрия объясняется тем, что щавелевая кислота является наиболее сильной органической кислотой.

Фосфорные соединения картофеля. Теория процесса фотосинтеза углеводов не объясняет природу связи фосфорных соединений с крахмалом. Пока остается невыясненным, являются ли фосфорные соединения только спутником крахмала или они органически связаны с его структурой. Предположения о том, что фосфорная кислота присоединена к амилопектину крахмала через гидроксил $<1-6>$ углеродного атома, вряд ли вероятны по той причине, что на 480 глюкозных остатков приходится, примерно, всего одна молекула фосфорной кислоты.

В свете современных представлений об энзиматическом распаде и синтезе компонентов крахмала весьма вероятным является предположение, высказанное Прокошевым С. М. [3], о том, что фосфорная кислота могла бы оказать существенное влияние на свойства нативного крахмала только в результате взаимодействия с какими-то редко встречающимися, но функционально очень важными группами. Прокошев С. М. высказывает предположение о том, что это взаимодействие фосфорной кислоты осуществляется гидроксилами, находящимися у первого углеродного атома в конце полисахаридной цепи.

Если принять среднее содержание золы в 1,09% по весу картофеля, а содержание P_2O_5 в золе в 17%, и допустить, что связывание минеральной кислоты при гидролизе картофеля происходит за счет реакции ее с двукальциевым фосфатом, то потери кислоты по этой причине должны составить по нашим расчетам около 0,7% H_2SO_4 и 0,5% HCl по весу крахмала в картофеле.

Таким путем было установлено, что общее количество минеральной кислоты, которое связывается с растворимыми некрахмалистыми веществами картофеля, равно в среднем около 7% H_2SO_4 и около 5% HCl по весу крахмала. Кроме того, образовавшиеся соединения тормозят реакцию гидролиза крахмала в картофеле.

Опыты показали, что удаление воднорастворимых веществ картофеля приводит к значительному повышению конечной доброкачественности гидролизата и ускорению реакции гидролиза.

Несколько серий опытов выполнено с целью изучения влияния степени удаления растворимых веществ картофеля на конечную доброкачественность гидролизата (выход глюкозы по весу сухих веществ) и расход серной и соляной кислоты для гидролиза картофеля.

По мере удаления растворимых веществ необходимый расход кислоты на гидролиз картофеля резко сокращается, а выход глюкозы значительно увеличивается (рис. 3). Так, например, максимальная доброкачественность гидролизата при гидролизе картофеля серной кислотой в присутствии растворимых веществ достигала 65,8, а после удаления растворимых веществ доброкачественность гидролизата повысилась до 84,3, т. е. на 28%.

Расход серной кислоты для гидролиза при давлении в 2,5 атм при этом сократился с 14% до 4% H_2SO_4 по весу крахмала.

Аналогичные опыты гидролиза проведены с соляной кислотой.

Из данных, приведенных на рис. 4, видно, что при равных условиях гидролиза, после удаления растворимых веществ картофеля необходимый расход кислоты для достижения максимальной доброкачественности

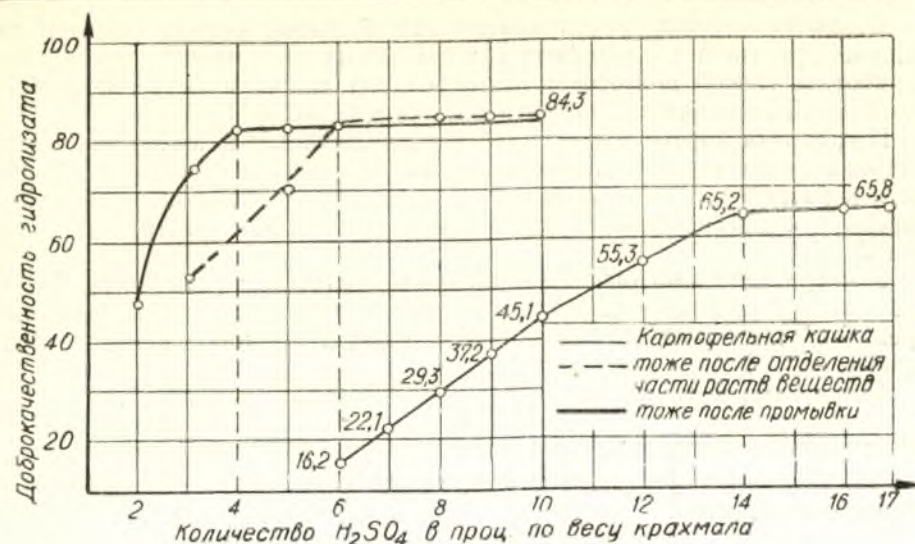


Рис. 3. Динамика хода гидролиза картофельной кашки с серной кислотой в зависимости от степени отделения растворимых веществ.

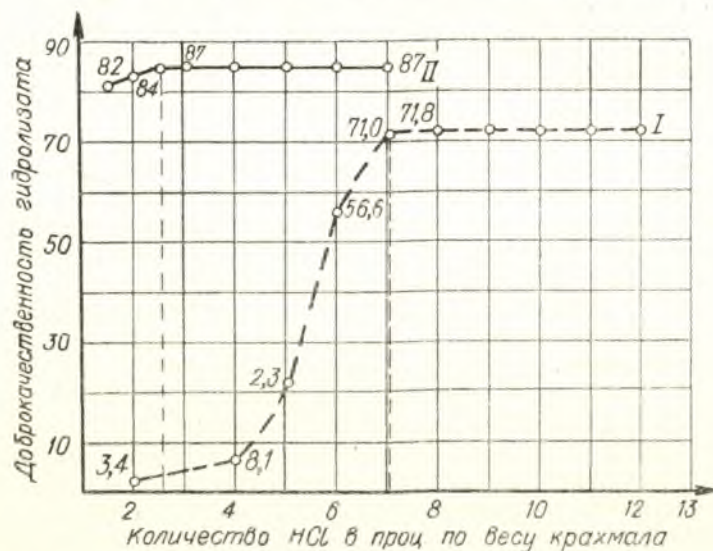


Рис. 4. Динамика гидролиза картофельной кашки до (I) и после (II) удаления растворимых веществ.

гидролизата сокращается с 7% до 2,5% HCl по весу крахмала. Что касается доброкачественности гидролизата (выход глюкозы), то она при этом увеличивается с 71,8 до 87, т. е. примерно на 20%.

Если в присутствии растворимых веществ картофеля при 2,5% HCl доброкачественность гидролизата равна 5 единицам, то в отсутствии этих веществ и при тех же условиях гидролиза доброкачественность гидролизата равна 87 единицам. Следовательно, выход глюкозы при этом увеличивается, примерно, в 17 раз. Аналогичная картина наблюдается при гидролизе серной кислотой.

Вскрытие причин, обуславливающих большой расход кислоты на гидролиз крахмала в картофеле и тормозящих этот процесс, позволили разработать способ подготовки картофельной кашки к гидролизу, обеспечивающий возможность снизить расход кислоты в 4—5 раз.

Подготовка картофеля к гидролизу заключается в измельчении его и отделении воднорастворимых веществ. При этом возникла необходимость в разработке способа контроля процесса подготовки картофеля к гидролизу с применением иономера КФ ВНИИСПа конструкции Егорова А. С.

Экспериментально был изучен режим подготовки картофеля. Опытным путем установлено количество основных групп растворимых веществ, переходящих в отжатую часть соковой воды и промой в процессе подготовки картофеля к гидролизу.

Результаты этого исследования представлены в таблице 7.

Таблица 7

Объект исследования	В проц. по весу картофеля					Отношение белкового к общему азоту в проц.
	сахара	зола	общий азот	белковый азот	небелко- вый азот	
Картофель	0,90	0,850	0,280	0,220	0,060	80,0
Соковая вода	0,64	0,525	0,108	0,127	0,041	75,6
Промой	0,20	0,140	0,033	—	—	—
Остается в промытой кашке	—	0,185	0,079	—	—	—

Приведенные результаты исследования показывают, что при подготовке картофеля к гидролизу (отделение соковой воды и промывка кашки) картофельная кашка освобождается от следующего количества растворимых веществ (в проц. по их весу в картофеле): золы — 78,1%, азотистых веществ — 71,8%, сахара — около 100%.

Как видно из приведенного, в процессе подготовки картофеля к гидролизу удаляются, во-первых, сбраживаемые сахара и, во-вторых, азотистые и минеральные вещества, мешающие гидролизу, но являющиеся вместе с тем весьма необходимыми для развития дрожжей в процессе сбраживания и определяющими качество барды.

Экспериментально доказана возможность возврата соковой воды в гидролизат перед сбраживанием последнего. При этом, с одной стороны, возвращаются почти все сбраживаемые сахара и другие ценные вещества, и, с другой стороны, используется способность растворимых веществ картофеля связывать кислоту для нейтрализации гидролизата, когда эти вещества по окончании гидролиза уже не могут помешать.

Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования были направлены на изучение технологического режима гидролиза, нейтрализации и сбраживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Н. М. Производство спирта из мха, сена, соломы, и новый способ винокурения минеральными кислотами, 1880.
2. Колани и Крюгер. Politechn. Zentralbl., стр. 1228, 1875.
3. Прокошев С. М. Биохимия картофеля, 1947.
4. Шарков В. И. Гидролизное производство, т. I, 1945; т. II, 1948.

(Получена редакцией 17 апреля 1952 г.).

Проф. ЗНАМЕНСКИЙ Г. М.,
доктор технических наук

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ОБОРУДОВАНИЯ САХАРНЫХ ЗАВОДОВ

(Кафедра специального оборудования)

В данной статье рассматривается вопрос о методах расчета технологического оборудования, имеющих своей целью определение производительности этого оборудования. Обычно производительность машин и аппаратов сахарного завода определяется в расчете на суточную переработку свеклы, выраженную в центнерах. Наиболее подробно расчетные формулы рассмотрены в книге: „Нормы расчета технической мощности оборудования свеклосахарных заводов“, Пищепромиздат, 1940 г. В этой книге даны выводы расчетных формул производительности по всем объектам технологического оборудования и даны примеры пользования этими формулами. Рассмотрение выводов формул показывает, что, несмотря на многообразие технологического оборудования сахарного завода, методика получения окончательных расчетных формул может быть сведена к небольшому количеству вариантов.

Пусть машина или аппарат в течение z минут перерабатывает G кг материала (сырья, полупродуктов, продуктов). Если выход этого материала на 100 кг свеклы (или в процентах по весу свеклы) составляет P кг (или $P\%$), то, очевидно, суточная производительность этого объекта оборудования будет:

$$A = \frac{G \cdot 24 \cdot 60 \cdot 100}{z P \cdot 100} = \frac{1440 G}{z P} \text{ ц/сутки.} \quad (1)$$

Если число установленных аппаратов m , а продолжительность их работы в течение суток менее 24 часов, то

$$A = \frac{1440 G m \varepsilon}{z P} \text{ ц/сутки.} \quad (1a)$$

Здесь ε — эксплуатационный коэффициент, причем $\varepsilon = \frac{T}{24}$, где T число часов работы аппаратов в течение суток.

Методы определения величины G различны для разных категорий машин и аппаратов. Отсюда получается несколько вариантов расчетных формул. Рассмотрим эти варианты.

I. Аппараты, для которых основным фактором, определяющим их производительность, является объем аппарата. Сюда относятся, например, мойки, диффузионные аппараты, различные котлы и т. д.

Полезная емкость любого из этих аппаратов, очевидно, должна быть

$$V_n = \frac{G}{\gamma} \text{ м}^3, \quad (2)$$

где γ —вес 1 м³ перерабатываемого материала, в кг.

Если обозначить через V полную емкость такого аппарата и через φ —коэффициент его заполнения ($\varphi < 1$), то

$$V_n = \varphi V \text{ м}^3. \quad (3)$$

Из формул (2 и 3) легко получить:

$$G = V\varphi\gamma \text{ кг}. \quad (4)$$

Подставляя это значение G в формулу (1а), получаем расчетную формулу для этой категории аппаратов в таком виде:

$$A = \frac{1440 \cdot V\varphi\gamma m \varepsilon}{Pz} \text{ ц/сутки}. \quad (5)$$

При пользовании этой формулой величины V и m берутся с натуры, P —на основании продуктового расчета, φ , γ , ε и z —по установленным техническим нормам. Если дана полезная емкость аппарата, то формула (5) принимает вид:

$$A = \frac{1440 \cdot V_n \gamma m \varepsilon}{Pz} \text{ ц/сутки}. \quad (6)$$

2. Аппараты, для которых основным фактором, определяющим их производительность, является величина рабочей поверхности, перпендикулярно к которой продвигается обрабатываемый материал. Сюда относятся фильтры всех систем, отстойники, фильтрующие ловушки, ситовые устройства.

В этом случае техническими нормами устанавливается скорость движения (скорость фильтрации, отстаивания и т. п.) продукта c в м/мин через поверхность аппарата. Очевидно, объемная производительность аппарата в минуту будет $V_n = cF$, а весовая $G = V_n \gamma = cF\gamma$ кг/мин.

Подставляя это значение G в формулу (1а) и принимая $z = 1$ мин. (c —отнесено к минуте), получаем расчетную формулу для этой категории аппаратов в таком виде:

$$A = \frac{1440 Fc\gamma m \varepsilon}{P} \text{ ц/сутки}. \quad (7)$$

3. Машины, в которых материал (продукт) передвигается вместе с рабочим органом машины, например: элеваторы, шнеки, ленточные и гребельные транспортеры, трясуны и др. В этом случае необходимо установить вес q материала на 1 пог. м рабочего органа машины. Тогда при линейной скорости движения рабочего органа v м/сек. минутная производительность машины будет:

$$G = qv \cdot 60 \text{ кг/мин.}$$

Подставляя это значение G в формулу (1а), получим

$$A = \frac{86 \cdot 400 qv m \varepsilon}{P} \text{ ц/сутки}. \quad (8)$$

Величина q зависит от конструктивных форм машины и свойств материала, которые при определении q учитываются техническими нормами (удельный вес и др.).

4. Машины, в которых материал и рабочие органы находятся во взаимно-относительном движении, например, свеклорезки и др. В такого рода машинах производительность пропорциональна объему, описываемому рабочим органом при его относительном движении. Обозначим через f —площадь рабочего органа, в м², в перпендикулярном направлении к движению. Тогда

$$G = fv\gamma \cdot 60 \text{ кг/мин.}$$

Подставляя это значение G в формулу (1) и учитывая, что G отнесено 1 минуте ($z = 1$), получим для m аппаратов при эксплуатационном коэффициенте ε :

$$A = \frac{86 \cdot 400 f v m \gamma \varepsilon}{P} \text{ ц/сутки}. \quad (9)$$

5. Тепловая аппаратура. Количество тепла, передаваемого в минуту через поверхность нагрева F м² при средней разности температур Δt_{cp} и коэффициенте теплопередачи K ккал/м² мин. град., будет:

$$Q = KF \Delta t_{cp} \text{ ккал/мин.} \quad (10)$$

С другой стороны, для нагрева за 1 минуту G кг. продукта, имеющего теплоемкость C ккал/кг град., от температуры t_1 до температуры t_2 требуется тепла:

$$Q = GC(t_2 - t_1)\beta \text{ ккал/мин.}, \quad (11)$$

где β —коэффициент ($\beta > 1$), учитывающий тепловые потери в окружающее пространство.

Должно быть

$$KF \Delta t_{cp} = GC(t_2 - t_1)\beta.$$

Отсюда,

$$G = \frac{KF \Delta t_{cp}}{C(t_2 - t_1)\beta} = KF x \text{ кг/мин.}, \quad (12)$$

где

$$x = \frac{\Delta t_{cp}}{C(t_2 - t_1)\beta}. \quad (13)$$

Подставляя значение G в формулу (1), получим ($z = 1$ мин):

$$A = \frac{1440 KF x m \varepsilon}{P} \text{ ц/сутки}. \quad (14)$$

Этой же формулой можно пользоваться и для расчета аппаратов, в которых производится выпаривание, но выражение для x будет в этом случае иное.

Пусть в аппарате выпаривается G кг воды в минуту, составляющее $P\%$ по весу свеклы. Тогда

$$Q = G(i - t_{кип})\beta \text{ ккал/мин.} \quad (15)$$

Здесь i —полное теплосодержание вторичного пара, $t_{кип}$ —температура кипения.

Приравнивая выражения (10 и 15) друг к другу, получим:

$$KF \Delta t_{cp} = G(i - t_{кип})\beta.$$

Отсюда,

$$G = \frac{KF\Delta t_{\text{ср}}}{(i - t_{\text{кип}})\beta} = Kx,$$

где

$$x = \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{(i - t_{\text{кип}})\beta}.$$

В приводимой далее таблице указано, какой из полученных формул следует пользоваться при расчете производительности того или иного объекта оборудования.

Наименование оборудования	Формула	Наименование оборудования	Формула
Гидравлический транспортер	7	Нагреватели сатурационного сока	14
Камнеловушка	6	Выпарные аппараты	14—16
Свеклоподъемное колесо	8	Сульфитаторы	5—6
Свекловичный шнек	8	Вакуум-аппараты	6—14
Мамут-насос	9	Мешалки-кристаллизаторы	6
Свекломойка	6	Центрифуги	5—6
Контрольный транспортер	8	Трясуны	8
Элеватор	8	Шнек желтого сахара	8
Свеклорезка	9	Клеровочные котлы	5—6
Транспортер для стружки	8	Сахарный элеватор	8
Диффузионный аппарат	6	Сушильный барабан	5—6
Пульповолушка	7	Грязевой шнек	8
Нагреватели	14	Грязевая мешалка	5
Дефекаторы	5—6	Отстойники грязных вод	5—6
Сатураторы	5—6	Жомомешалка	5—6
Отстойники сатурационного сока	7	Газовая печь	5
Вакуум-фильтры	7	Известгасильный барабан	5
Фильтр-прессы	7	Песколовушка отстойная	5
Механические фильтры	7	Мешалка известкового молока	5

Пользование приведенными формулами не должно встречать затруднений. Ряд входящих в формулы величин, как-то: ϵ , γ , z , c , v и K , как указывалось ранее, дается техническими нормами. Количество продуктов P берется на основании продуктового расчета. Наконец, некоторые величины определяются на основании замеров в натуре с проведением в необходимых случаях простейших расчетов. Особое внимание следует уделять при выполнении расчетов правильному выбору размерностей величин, входящих в расчетные формулы.

(Получена редакцией 17 мая 1952 г.)

Асп. ДЕМЧУК Г. С. и доц. ПОПОВ В. Д.,
кандидат технических наук

ДЕПРЕССИЯ ПРИ ВАРКЕ РАФИНАДНОГО УТФЕЛЯ

(Кафедра процессов и аппаратов)

В производство 1951/52 г. на Одесском рафинадном заводе мы произвели измерения общей температурной депрессии при варке утфеля II рафинада.

В опытах с помощью термопар и потенциометра измерялись температуры утфеля и вторичного пара [1]; разрежение измерялось ртутным вакууметром, в показания которого вносились поправки по барометру, в соответствии с атмосферным давлением и температурой воздуха вблизи вакуум-аппарата. Запись измерений производилась через каждые 5 минут от начала варки. Всего за 40 варок было получено 780 опытных точек; эти точки нанесены на рис. 1 в координатах: общая депрессия Δ в градусах — относительное время варки $\frac{\tau}{\tau_{\text{ц}}}$ ($\tau_{\text{ц}}$ — размерное активное время цикла варки, τ — время от начала варки). Опытные точки относятся к различным тепловым потокам и разрежениям; несмотря на значительный разброс точек, основная их масса группируется вблизи проведенной кривой линии, которая в первом приближении отражает закономерность изменения общей депрессии в процессе варки. Эта кривая отвечает среднему разрежению $B = 553$ мм рт. ст. и условиям варки в аппарате с подвесной камерой, емкостью 16 т сваренного утфеля.

Используя полученную кривую общей депрессии и результаты исследования теплового режима того же аппарата [1], мы попытаемся выяснить порядок величины гидростатической депрессии и установить ее зависимость от теплового потока и связь с паросодержанием увариваемой массы.

Для этой цели сначала надо выделить из общей депрессии ту ее часть, которая зависит от свойств межкристального сиропа — физическую депрессию. Расчет дается в таблице 1.

Графы таблицы 1 заполняются в следующем порядке:

1. Номера расчетных точек.

2. Относительное время от начала варки, с интервалом $0,05 \frac{\tau}{\tau_{\text{ц}}}$.

3. Общая концентрация увариваемой массы, в процентах, по опытными данным [1] (B_p — безводная часть раствора).

4. Общая депрессия $\Delta = \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{г}}$, где $\Delta_{\text{д}}$ — физическая депрессия, $\Delta_{\text{г}}$ — искомая гидростатическая депрессия, по опытным данным (кривая на рис. 1).

5. Температура кипения сиропа и утфеля $t_y = t'_y + \Delta$, где $t'_y = 67,3^\circ$ — температура вторичного пара, соответствующая среднему по опытным данным разрежению $B = 553$ мм рт. ст.

6 и 7. Коэффициент пересыщения Π и растворимость $\frac{z_0}{W}$, рассчитанные по температурам кипения утфеля (графа 5) и общей концентрации (графа 3) с помощью номограммы пересыщения [2].

При расчете приближенно принята доброкачественность утфеля $Дб=100$, поэтому $Бр=z\%$ (z — процентное содержание чистого сахара).

8. Весовое процентное содержание кристаллического сахара, по формуле:

$$Кр = Бр_y - \Pi \frac{z_0}{W} (100 - Бр_y) \% \quad (1)$$

9. Концентрация межкристального сиропа (патоки) в процентах, по формуле:

$$Бр_{п} = \frac{Бр - Кр}{100 - Кр} \quad (2)$$

10. Физическая депрессия Δ_d при $B=553$ мм рт. ст. и данной концентрации патоки (графа 9), по графику депрессии чистых растворов [3] или таблицам Бухарова П. С. и Тищенко И. А. [4].

11. Гидростатическая депрессия $\Delta_r = \Delta - \Delta_d$.

Таблица 1

№№ точек	$\frac{\tau}{\tau_{ц}}$	$Бр_y$	Δ°	t°_y	Π	$\frac{z_0}{W}$	$Кр$	$Бр_{п}$	Δ°_d	Δ°_r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,00	73,5	5,8	73,1	0,83	2,78	—	73,5	5,2	0,6
2	0,05	76,0	7,2	74,5	0,93	3,16	—	76,0	6,15	1,05
3	0,10	78,4	8,5	75,8	1,06	3,73	—	78,4	7,20	1,30
4	0,15	80,6	9,7	77,0	1,19	4,15	—	80,6	8,10	1,60
5	0,20	82,3	10,6	77,9	1,27	4,47	3,1	81,7	8,75	1,85
6	0,25	83,5	11,2	78,5	1,33	4,70	6,0	82,5	8,15	2,05
7	0,30	84,4	11,2	78,5	1,27	4,50	14,0	81,8	9,85	2,35
8	0,35	85,2	10,9	78,2	1,22	4,31	21,4	81,1	8,45	2,45
9	0,40	85,9	10,7	78,0	1,17	4,13	27,7	80,6	8,10	2,60
10	0,45	86,4	10,6	77,9	1,15	4,06	31,2	80,1	7,90	2,70
11	0,50	87,0	10,7	78,0	1,10	3,87	36,6	79,5	7,70	3,00
12	0,55	87,6	10,9	78,2	1,10	3,89	39,4	79,5	7,70	3,20
13	0,60	88,1	11,0	78,3	1,10	3,90	41,6	79,5	7,65	3,35
14	0,65	88,6	11,3	78,6	1,10	3,91	44,0	79,6	7,75	3,55
15	0,70	89,1	11,7	79,0	1,10	3,92	46,3	80,0	7,80	3,90
16	0,75	89,5	12,0	79,3	1,10	3,94	48,1	80,0	7,80	4,20
17	0,80	90,0	12,4	79,7	1,10	3,96	50,4	79,5	7,73	4,67
18	0,85	90,5	12,9	80,2	1,10	3,99	52,6	80,0	7,80	5,10
19	0,90	91,0	13,4	80,7	1,10	4,01	55,0	80,3	8,00	5,40
20	0,95	91,5	13,9	81,2	1,12	4,09	56,8	80,1	7,90	6,00
21	1,00	92,0	14,5	82,8	1,15	4,28	57,6	80,7	8,20	6,30

Данные таблицы 1 представлены графически на рис. 2, где показаны: кривая общей депрессии Δ по рис. 1, кривые физической депрессии Δ_d по расчету (графа 10) и гидростатической Δ_r (графа 11) по расчету.

Анализируя факторы, влияющие на физическую депрессию, замечаем, что она остается почти постоянной в течение второго периода

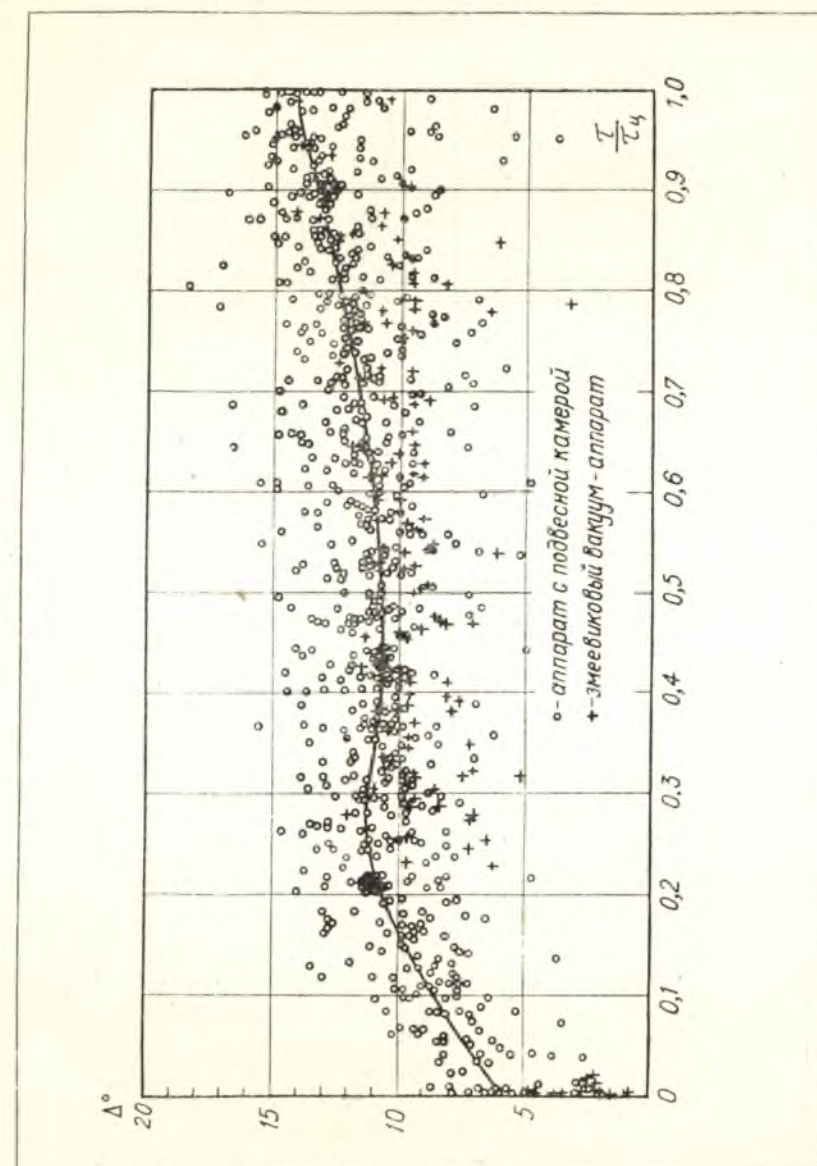


Рис. 1.

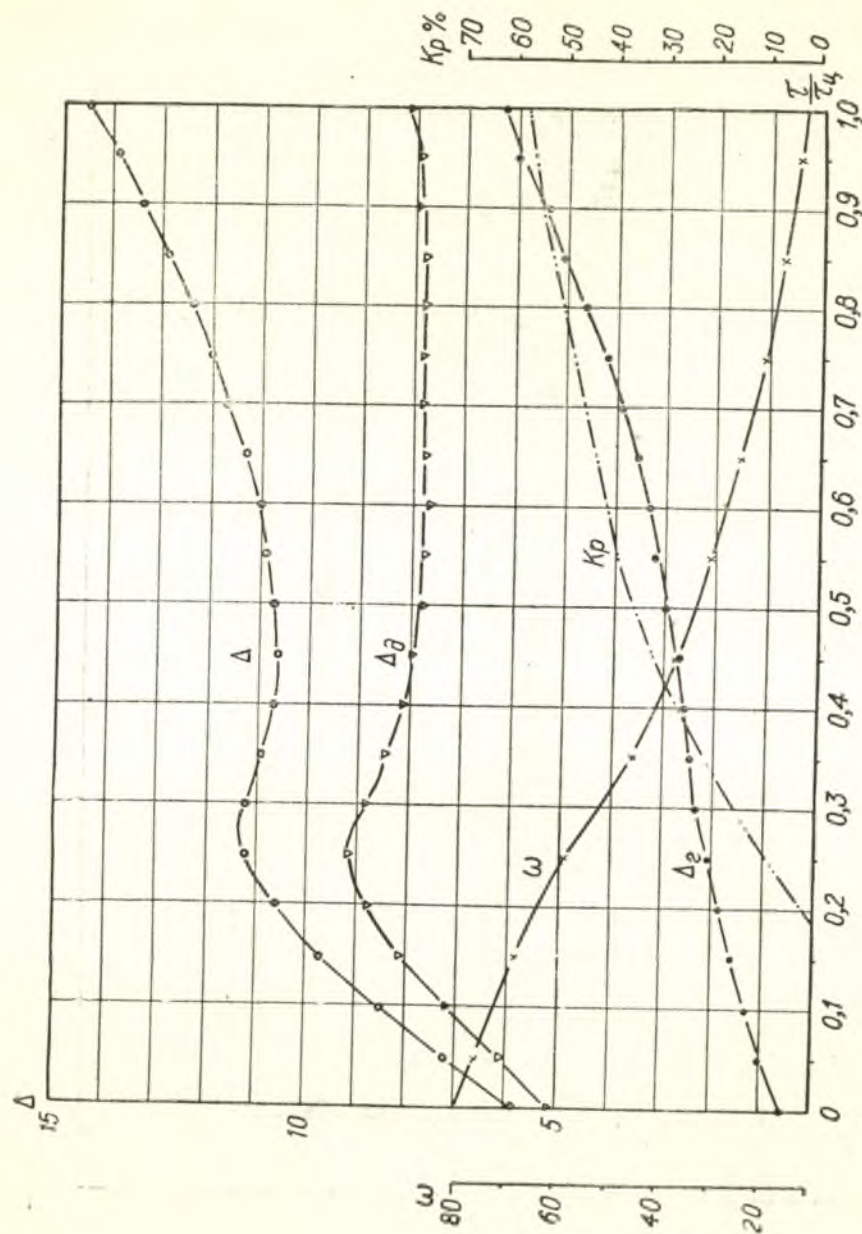


Рис. 2.

варки, когда постоянны пересыщение и концентрация межкристалльного сиропа. В начальный период варки физическая депрессия изменяется вместе с пересыщением и концентрацией, возрастая к моменту заводки кристаллов и уменьшаясь с началом подкачек и падением пересыщения.

Гидростатическая депрессия в течение варки непрерывно возрастает, примерно, от $0,6$ до 6° , хотя можно было ожидать ее уменьшения в первый период варки, когда уровень раствора заметно понижается. В некоторой степени здесь отражается влияние возрастающего удельного веса увариваемой массы и воздействие твердой фазы (рис. 2), но в большей мере, повидимому, влияет тепловой поток и паросодержание утфеля.

Во всяком случае, величина гидростатической депрессии не достигает тех значений, которые до настоящего времени были рекомендованы для расчета [5].

Установим связь гидростатического эффекта и теплового потока, используя эмпирическую формулу для коэффициента теплопередачи в рафинадных вакуум-аппаратах [1, 6] и среднее изменение полезной разности температур по опытным данным.

На рис. 3 нанесены опытные значения $\Delta t = t_s - t_y$, где t_s — температура насыщения греющего пара (по давлению), t_y — температура утфеля. Опытные точки ложатся на графике широкой полосой, но общая закономерность может быть отражена некоторой средней линией. Колебания в значениях Δt объясняются различным давлением греющего пара и разным разрежением, зафиксированными для отдельных варок. Для получения некоторой средней кривой изменения Δt во времени, на общий график нанесены точки для всех сорока варок.

Имея кривую для Δt , можем рассчитать коэффициенты теплопередачи по формуле [1, 6]:

$$K = \xi(Bp) p^{0,87} \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град.} \quad (3)$$

В этой формуле давление $p = \frac{760 - 533}{735}$ и $p^{0,87} = 0,333$. Следовательно, в нашем случае:

$$K = 0,333 \xi(Bp) \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град.} \quad (4)$$

Определив K , найдем для каждого момента времени варки $q = K \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ и весовое напряжение поверхности нагрева $u = q : 560 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$, где 560 ккал/кг — приближенное значение расхода тепла на испарение 1 кг воды из утфеля.

Расчет приведен в таблице 2 (стр. 93).

В графе 3 записаны значения Δt по рис. 3, в графе 4 — значения $\xi(Bp)$, взятые по номограмме [1] в зависимости от концентрации утфеля (таблица 1, графа 3). Далее следуют вычисления K по формуле (4), теплового потока и весового напряжения.

Рис. 4 иллюстрирует результат расчета: видна ясно выраженная связь гидростатической депрессии и теплового потока. Если тот же график изобразить в полудогарифмических координатах (рис. 5), то зависимость в первом приближении выразится следующей эмпирической формулой:

$$\Delta_r = 13,2 \cdot e^{-0,0000662} \text{ град,} \quad (5)$$

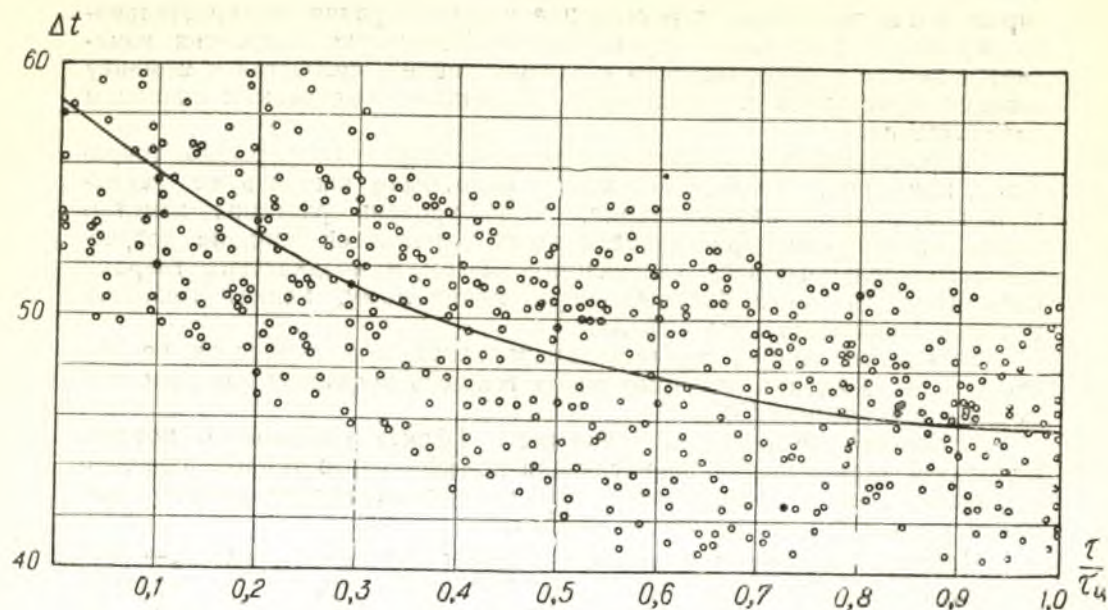


Рис. 3.

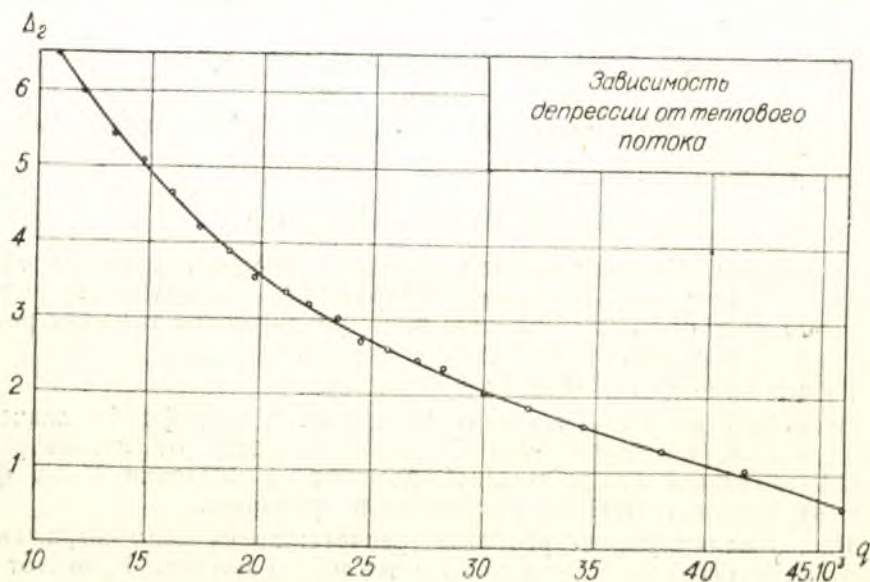


Рис. 4.

Таблица 2

№№ точек	$\frac{\tau}{\tau_n}$	Δt	ξ (Бр)	K	q	u
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	58,4	40,7	790	46 200	82,5
2	0,05	57,0	38,6	730	41 600	74,4
3	0,10	55,5	36,8	678	37 700	67,4
4	0,15	54,2	35,3	636	34 400	61,5
5	0,20	53,0	34,2	603	31 950	57,0
6	0,25	52,0	33,4	578	30 000	54,6
7	0,30	51,0	32,7	555	28 300	50,6
8	0,35	50,3	32,0	535	26 900	48,0
9	0,40	49,6	31,3	517	25 600	45,7
10	0,45	49,0	30,7	500	24 500	43,8
11	0,50	48,5	30,0	485	23 500	42,0
12	0,55	48,0	28,9	462	22 200	39,7
13	0,60	47,6	27,9	443	21 100	37,7
14	0,65	47,1	26,7	418	19 700	35,2
15	0,70	46,8	25,3	397	18 600	33,2
16	0,75	46,2	24,2	372	17 150	30,6
17	0,80	46,1	22,5	345	15 900	28,4
18	0,85	46,0	20,8	319	14 700	26,3
19	0,90	45,9	19,0	290	13 300	23,8
20	0,95	45,8	17,3	264	12 100	21,6
21	1,00	45,8	15,5	237	10 850	19,4

где:

$e = 2,718...$ — основание натуральных логарифмов,
 q ккал/м² · час — тепловой поток.

Полученная формула имеет частный характер, так как в правой части ее заключено влияние удельного веса увариваемой массы и высоты ее свободного уровня над поверхностью нагрева. По предложению Знаменского Г. М., в дальнейшем надо искать решение в виде:

$$\Delta_t = \Delta_{ст} - f(q), \quad (6)$$

где:

$\Delta_{ст}$ — «статическая» часть депрессии, обусловленная давлением столба утфеля без учета паросодержания; значит, $\Delta_{ст} = \varphi(H \gamma)$, где H — высота столба утфеля, γ — его удельный вес;
 $f(q)$ — «динамическая» часть, связанная с паросодержанием.

Возможно, что обнаружится и некоторое специфическое влияние содержания твердой фазы и увеличения вязкости увариваемой массы на паросодержание утфеля; известно, что по мере сгущения утфеля скорость подъема паровых пузырей заметно уменьшается.

На рис. 6 по данным таблицы 2 показана видимая связь гидростатической депрессии с содержанием кристаллов в утфеле; график включает влияние теплового потока, удельного веса и высоты столба жидкости. Действительная зависимость, повидимому, не будет столь значительной, как кажется по этому графику.

Теперь установим, хотя бы качественно, связь гидростатической депрессии с паросодержанием.

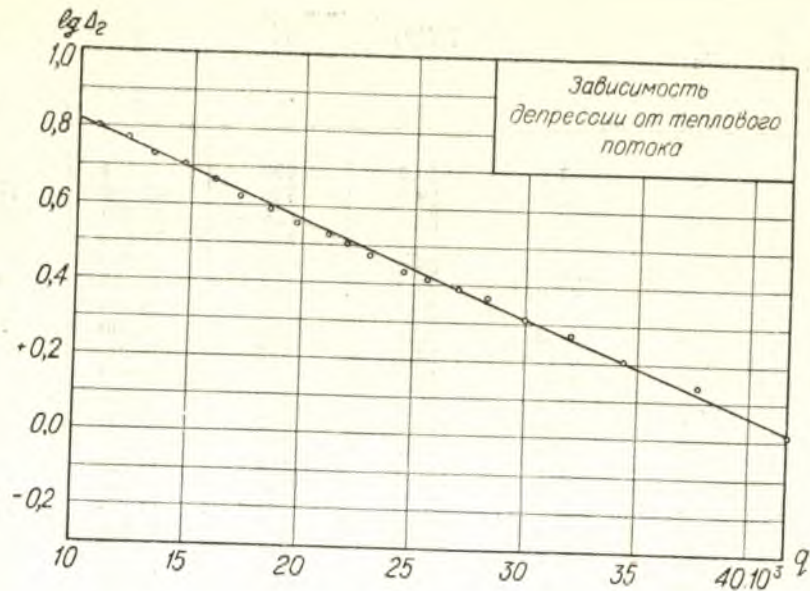


Рис. 5.

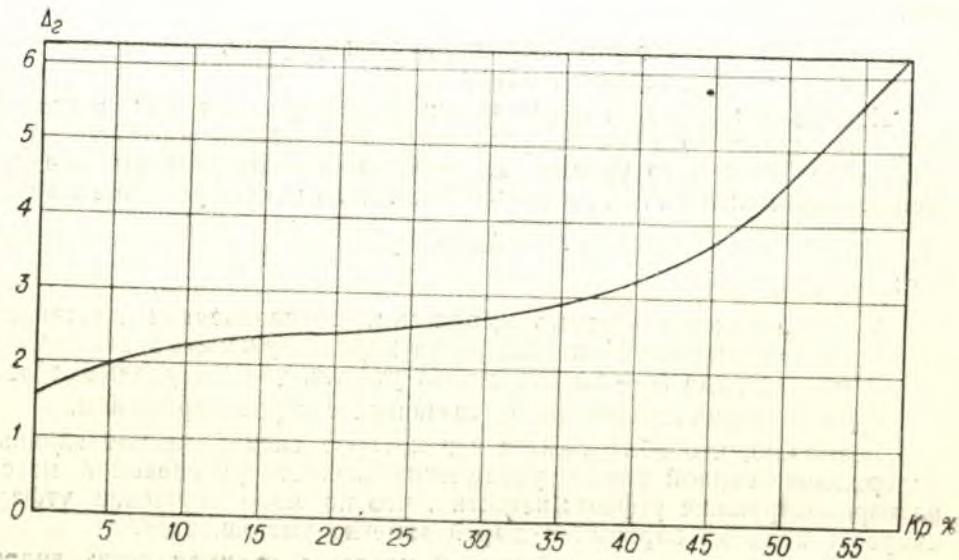


Рис. 6.

Ввиду того, что вопросы циркуляции утфеля в вакуум-аппаратах совершенно не исследованы, и мы не располагаем данными о скорости движения пара и пароутфельной смеси в трубках подвесной камеры, в настоящее время еще нельзя указать истинное значение паросодержания утфеля. Поэтому ниже мы пользуемся величинами условного паросодержания, под которым следует понимать соотношение объемов пара и увариваемой массы за некоторый, произвольно взятый, небольшой промежуток времени варки.

Для расчета условного паросодержания необходимо построить график процесса варки [3, 6], приняв некоторые средние условия по опытным данным.

В среднем, при опытах на Одесском заводе наблюдались такие значения исходных величин:

1. Общее количество сиропа, увариваемого в вакуум-аппарате за один цикл, $\Sigma S = 20\,000$ кг.

2. Начальная нагрузка сиропа в аппарат — около 50% общего количества увариваемого сиропа, т. е. $S_{II} = 0,5 \cdot \Sigma S = 10\,000$ кг.

3. Общее время цикла $\tau_{II} = 100$ минут.

4. Время сгущения до пробы — около $0,2 \frac{\tau}{\tau_{II}}$, и время отваривания — $0,1 \frac{\tau}{\tau_{II}}$.

Кроме этих величин, для построения графика процесса надо знать закономерность изменения суммы выпариваемой воды и средний режим подкачек.

Выпариваемая вода распределяется во времени варки по соотношению [3, 6]:

$$w_i = \frac{K_i \Delta t_i}{\sum_1^n K \Delta t} \sum_1^n w, \quad (7)$$

где индекс i относится к одному из равных расчетных отрезков времени цикла (мы примем $\Delta \frac{\tau}{\tau_{II}} = 0,05 \frac{\tau}{\tau_{II}}$), а индекс n — число этих отрезков времени, заключенных в общем времени цикла.

Общая сумма выпариваемой воды $\sum_1^n w = \Sigma W_k$, при выходе утфеля $S_k = 16\,000$ кг, будет: $\Sigma W_k = 20\,000 - 16\,000 = 4\,000$ кг.

Результаты расчета по формуле (7) даны в таблице 3, где в графах 3 и 4 показаны значения K и Δt , усредненные за время $0,05 \frac{\tau}{\tau_{II}}$ (по данным таблицы 2), в графе 6 — суммы произведений $K_{ср} \Delta t_{ср}$ нарастающим итогом, и в графе 7 — доли общей суммы выпариваемой воды, приходящиеся на данный отрезок времени. В соответствии с этими долями в графе 8 показано количество испаряемой за данный (i -й) отрезок времени воды, в кг, и в графе 9 — сумма выпаренной воды, в кг, нарастающим итогом.

Таблица 3

№№ точек	$\frac{\tau}{\tau_2}$	$K_{ср}$	$\Delta t_{ср}$	$K_{ср} \Delta t_{ср}$	$\sum_1^i K_{ср} \Delta t_{ср}$	$\frac{K_i \Delta t_i}{\sum_1^n K \Delta t}$	w_i	$\sum_1^i w$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,025	760,0	57,70	43 800	43 800	0,0900	360,0	360,0
2	0,075	704,0	56,75	39 900	83 700	0,0818	327,2	687,2
3	0,125	657,0	54,85	36 050	119 750	0,0740	296,0	983,2
4	0,175	619,5	53,60	33 200	152 950	0,0682	272,8	1256,0
5	0,225	590,5	52,50	31 300	184 250	0,0643	257,2	1513,2
6	0,275	565,0	51,50	29 100	213 350	0,0597	238,8	1752,0
7	0,325	545,0	50,65	27 600	240 950	0,0566	226,4	1978,4
8	0,375	526,0	49,95	26 300	267 200	0,0540	216,0	2194,4
9	0,425	508,5	49,30	25 100	292 300	0,0515	206,0	2400,4
10	0,475	492,5	48,75	24 000	316 300	0,0493	197,2	2597,6
11	0,525	473,5	48,25	22 800	339 100	0,0468	187,2	2784,8
12	0,575	452,5	47,80	21 650	360 750	0,0445	178,0	2962,8
13	0,625	430,5	47,35	20 600	381 300	0,0422	168,8	3131,6
14	0,675	407,5	46,95	19 100	400 400	0,0392	156,8	3288,4
15	0,725	384,5	46,50	17 900	418 300	0,0368	147,2	3435,6
16	0,775	358,5	46,15	16 050	434 350	0,0330	132,0	3576,6
17	0,825	332,0	46,05	15 300	449 650	0,0312	124,8	3692,4
18	0,875	304,5	45,95	13 950	463 600	0,0286	114,4	3806,8
19	0,925	274,5	45,85	12 550	476 150	0,0257	102,8	3909,6
20	0,975	250,5	45,80	11 480	487 630	0,0226	90,4	4000,0
С у м м а					487 630	1,0000	4000,0	4000,0

Средний режим подкачек, по тем же опытным данным, представляется в следующем виде:

τ/τ_2	$\sum S_n \%$	$\sum S_n$
0,07	9,72	972
0,222	28,53	2853
0,375	48,1	4810
0,500	63,5	6350
0,611	77,25	7725
0,75	88,75	8875
0,903	96,9	9690
1,000	100,0	10000

Здесь τ_2 — время второго периода варки, $\sum S_n$ — сумма подкачиваемого сиропа; общее количество подкачек, по исходным данным $\sum S_{пк} = \sum S - S_n = 20\,000 - 10\,000 = 10\,000$ кг.

График процесса, построенный по этим данным, показан на рис. 7. Порядок построения такой [3]: в пределах первого и третьего периодов варки проводятся горизонтальные линии через отметки по оси ординат S_n и $\sum S$. Потом в пределах второго периода строится кривая подкачек по значениям $\sum S_n$, и от этой кривой откладываются вниз значения $\sum w$, взятые из таблицы 3 (графа 9). Получаем кривую веса увариваемой массы S .

Дальнейшие вычисления даны в таблице 4.

Таблица 4

№№ точек	$\frac{\tau}{\tau_2}$	$\frac{Fuv''}{6}$	γ_y	S_y	V_y	$10 V_{ср}$	ω
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	850	1,367	10,00	7,32		
2	0,05	5260	1,335	9,50	6,85	69,4	76,0
3	0,10	4770	1,401	9,20	6,56		
4	0,15	4350	1,415	8,80	6,22	63,5	68,5
5	0,20	4030	1,427	8,75	6,14		
6	0,25	3870	1,435	9,50	6,62	65,85	58,8
7	0,30	3580	1,441	10,15	7,03		
8	0,35	3390	1,447	10,80	7,48	74,85	45,3
9	0,40	3230	1,451	11,50	7,94		
10	0,45	3100	1,455	12,15	8,35	83,05	37,4
11	0,50	2980	1,459	12,65	8,67		
12	0,55	2810	1,463	13,35	9,10	91,1	30,9
13	0,60	2670	1,467	14,00	9,55		
14	0,65	2495	1,470	14,70	10,00	98,65	25,3
15	0,70	2350	1,474	15,00	10,18		
16	0,75	2160	1,477	15,40	10,40	104,3	20,75
17	0,80	2010	1,480	15,80	10,68		
18	0,85	1860	1,483	16,10	10,87	107,9	17,25
19	0,90	1685	1,487	16,25	10,90		
20	0,95	1530	1,490	16,10	10,80	108,0	14,15
21	1,00	1370	1,493	16,00	10,70		

В графе 3 при поверхности нагрева аппарата $F = 75,3$ м² и удельном объеме вторичного пара $v'' = 5,644$ м³/кг (при разрежении 533 мм рт. ст.) подсчитано количество пара, образующегося на поверхности нагрева за 10 минут, по выражению $\frac{10}{60} Fuv''$ м³.

В графе 4 подсчитан удельный вес увариваемой массы по приближенной формуле Знаменского Г. М. [7]:

$$\gamma_y = 1,0118 + 0,0034 Br + 0,00002 Br^2 \text{ т/м}^3. \quad (8)$$

Значения Br взяты из таблицы 1 и представлены кривой на рис. 7; там же нанесена кривая величин γ_y .

В графе 5 записаны значения веса увариваемой массы в t , взятые по кривой S рис. 7.

В графе 6 вычислен объем увариваемой массы при данном удельном весе; кривая изменения объема V м³ нанесена на рис. 7.

В графе 7 показан объем массы, увариваемой за 10 минут, в м³, усредненный за время $0,1 \frac{\tau}{\tau_2}$.

Наконец, в графе 8 вычислено условное паросодержание по формуле:

$$\omega = \frac{10 Fuv''}{60 \cdot 10 V_{ср}} \text{ м}^3 \text{ пара/м}^3 \text{ утфеля}. \quad (9)$$

Результат расчета показан на рис. 8, из которого следует, что гидростатическая депрессия существенно зависит от паросодержания.

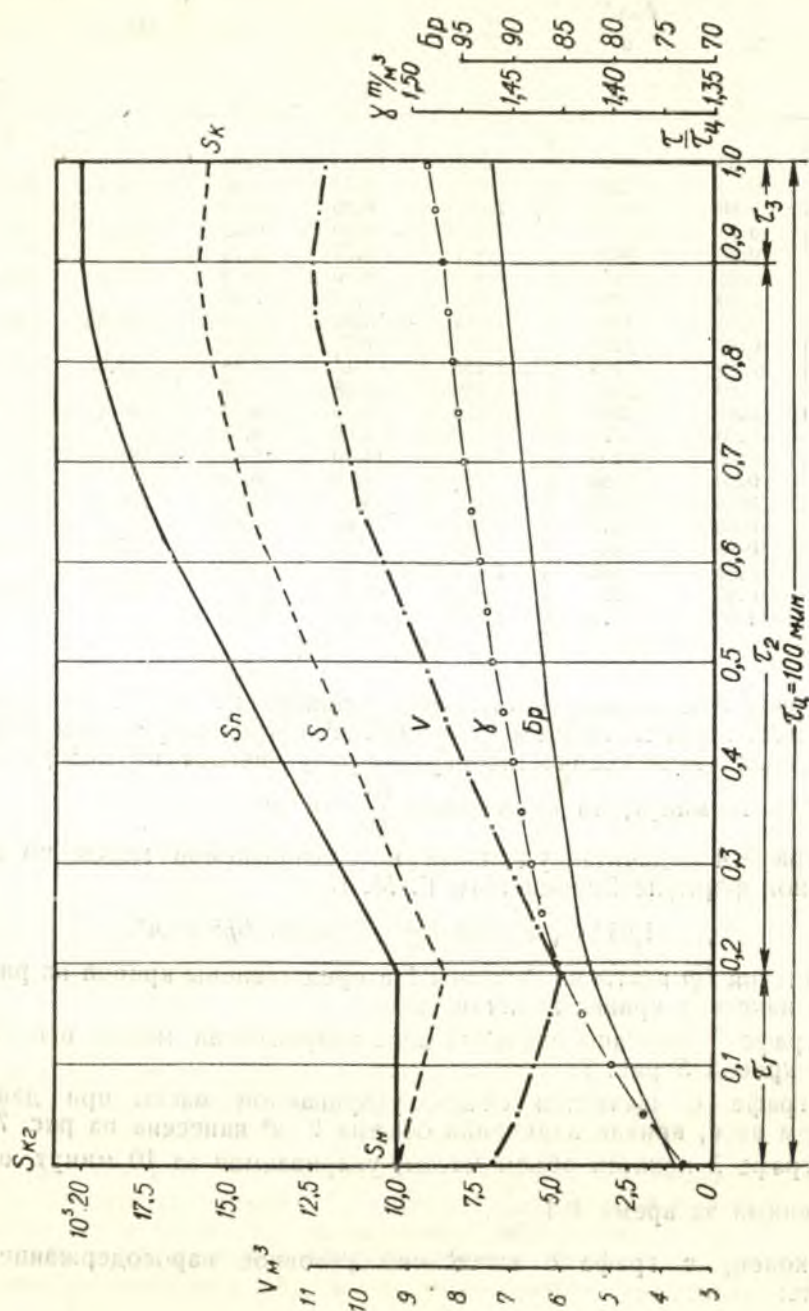


Рис. 7.

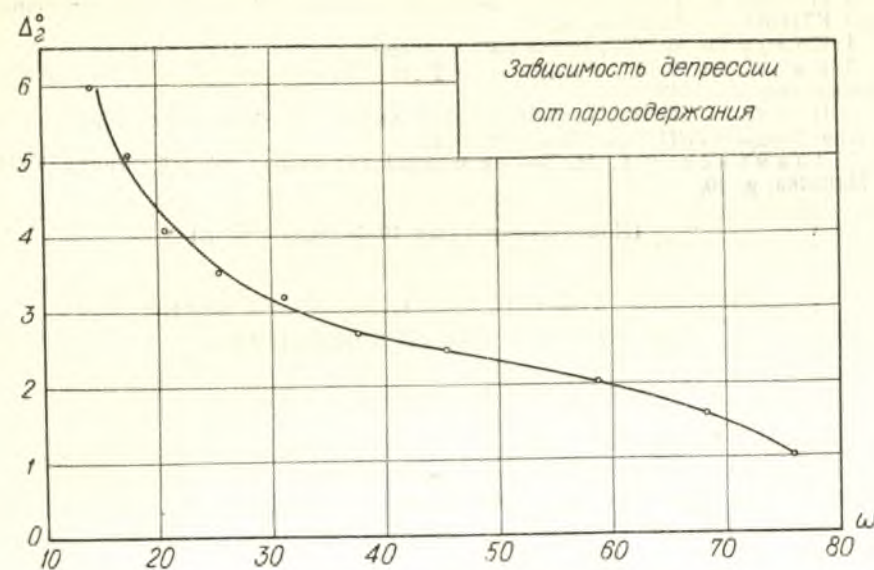


Рис. 8.

Количественные расчетные соотношения должны быть получены в результате дальнейших опытов.

Выводы

1. Проведенные на Одесском рафинадном заводе опыты позволяют указать порядок величины общей депрессии и рекомендовать для приближенных расчетов ее значения, приведенные в таблице I в зависимости от общей концентрации утфеля. Данные справедливы для утфеля II рафинада и вакуум-аппаратов с высотой уровня утфеля над серединой поверхности нагрева порядка 2,0 — 2,5 м.

2. Показано, что гидростатическая депрессия не достигает значений, которые ранее были рекомендованы для расчетов.

3. Для частного случая установлен вид зависимости гидростатической депрессии от теплового потока.

4. Установлена качественно связь гидростатической депрессии с паросодержанием увариваемой массы.

В заключение подчеркнем, что выяснение общей зависимости гидростатической депрессии от теплового потока, паросодержания, концентрации утфеля и глубины затопления поверхности нагрева возможно только при постановке специальных опытов на установке, где возможно независимое изменение этих величин в широких пределах.

В дальнейшем предполагается постановка таких опытов в связи с исследованием теплообмена в вакуум-аппаратах различных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В. Д. Коэффициенты теплопередачи в рафинадных вакуум-аппаратах. Труды КТИП им. Микояна, в. 12.
2. Попов В. Д. Диаграмма теплосодержания сахарных растворов и утфеля. Труды КТИП им. Микояна, в. 12.

3. Попов В. Д. К вопросу о тепловом расчете утфельных вакуум-аппаратов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
4. Силин П. М. Технология свеклосахарного производства, 1949.
5. Кичигин М. А., Костенко Г. Н. Рационализация теплового хозяйства сахарных заводов, 1949.
6. Попов В. Д. Примерный тепловой расчет вакуум-аппарата периодического действия, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.
7. Знаменский Г. М. Теория центрифугирования утфелей, Труды КТИПП им. Микояна, в. 10.

(Получена редакцией 19 февраля 1952 г.)

Доц. ПОПОВ В. Д.,
кандидат технических наук

ПРИМЕРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ВАКУУМ-АППАРАТА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

(Кафедра процессов и аппаратов)

Современный тепловой расчет утфельного вакуум-аппарата должен быть основан на принципах совместного рассмотрения явлений теплообмена и массообмена (кристаллизации) при варке утфеля. Эти явления должны рассматриваться в их развитии во время процесса [1].

Предложенный нами метод теплового расчета опирается на теоретическое и опытное исследование динамики теплообмена и кристаллизации при варке утфеля [2]. Накопленные данные еще не позволяют найти поверхность нагрева вакуум-аппарата по развернутой, полной схеме теплового расчета [3]; однако эти данные уже достаточно точны для приближенного расчета, в котором можно наглядно показать влияние ряда основных факторов в их взаимодействии и развитии [4, 5].

В настоящей работе мы даем пример приближенного теплового расчета вакуум-аппарата периодического действия по предложенной нами схеме [2]. Пример разработан для рафинадного вакуум-аппарата, с использованием результатов испытаний на Одесском рафинадном заводе [6]. Аналогично может быть рассчитан вакуум-аппарат периодического действия 1 продукта сахаропесочного производства, с использованием иных, соответствующих этому случаю, исходных данных [2, 5].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Требуется определить поверхность нагрева вакуум-аппарата с подвесной камерой, емкостью 16 т сваренного утфеля. На уваривание поступает сироп с постоянной начальной концентрацией 73,5%; уваривание производится до конечной концентрации 92%. Среднее разрежение в аппарате 550 мм рт. ст. ($t_{вт} = 67,6^\circ$), которое остается неизменным от начала до конца варки. Аппарат обогревается насыщенным паром с постоянной температурой насыщения $t_s = 130^\circ$. Активное время варки, вычисленное по скорости кристаллизации (условно) $\tau_{к} = 80$ минут. Варка производится при непрерывной подкачке, при кондуктометрическом контроле пересыщения и градуированных сиропных сборниках с показателем расхода у сиропного вентилля, либо при наличии программного автоматического регулятора на подаче сиропа. В аппарате уваривается утфель II рафинада.

РАСЧЕТ СУММАРНЫХ КОЛИЧЕСТВ

Общее количество использованного сиропа определяется из уравнения материального баланса сухих веществ:

$$\Sigma S \gamma_n = S_k \gamma_k \text{ кг} \quad (1)$$

или

$$\Sigma S_1 0,735 = 16\,000 \cdot 0,92;$$

откуда

$$\Sigma S = 16\,000 \frac{0,92}{0,735} = 20\,050 \text{ кг.}$$

Общее количество выпаренной воды определим из уравнения материального баланса сиропа и утфеля:

$$\Sigma W_k = \Sigma S - S_k = 20\,050 - 16\,000 = 4\,050 \text{ кг.} \quad (2)$$

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Коэффициенты теплопередачи рассчитываем по формуле [6]:

$$K = \xi(Bp) p^{0,87} \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}, \quad (3)$$

где:

$\xi(Bp)$ — некоторая функция общей концентрации увариваемой массы, которая берется по номограмме [6];

p — давление вторичного пара в кг/см²;

Δt — разность температур греющего пара и кипящего утфеля.

Так как коэффициенты теплопередачи изменяются вместе с концентрацией утфеля, то их надо связать во времени с изменением общей концентрации. Концентрация в первом приближении отражает процесс массообмена и превращения (кристаллизации).

Кроме того, коэффициенты теплопередачи определяются величиной $\Delta t = t_g - t_y$, а $t_y = t_{вт} + \Delta$, где Δ — общая депрессия. Следовательно, при постоянном давлении греющего пара и постоянном разрежении в аппарате, что обусловлено в исходных данных, Δt изменяется в процессе варки вместе с депрессией.

Закономерности изменения общей концентрации и депрессии установлены опытным путем [6, 7].

Расчет коэффициентов теплопередачи ведем в таблице I по отдельным периодам цикла. Условимся называть периодом цикла любую часть относительного времени варки, а периодом варки — одну из основных, принципиально отличающихся по режиму работы частей цикла. Так, первый период варки — сгущение до заводки кристаллов, второй период варки — уваривание при подкачках, третий период варки — отваривание до конечной концентрации с момента прекращения подкачек. Время варки делим на 20 равных частей — периодов цикла (для более грубых расчетов достаточно взять 10 частей). В отдельные графы таблицы по порядку вписываем следующие величины:

1. Номера расчетных точек графика процесса.
2. Относительное время от начала варки, с интервалом 0,05.
3. Общая концентрация увариваемой массы, в процентах, по опытной кривой [6] (с обозначением Bp — безводная часть раствора).
4. Общая депрессия Δ° , по опытной кривой [7].

5. Температура кипения утфеля $t_y = t_{вт} + \Delta$, при постоянной $t_{вт} = 67,6^\circ$ (по условию).

6. Полезная разность температур $\Delta t = t_g - t_y$, при постоянной $t_g = 130^\circ$ (по условию).

7. Значения $\xi(Bp)$, соответствующие концентрациям, записанным в графе 3, по номограмме [6].

8. Коэффициенты теплопередачи по формуле (3) при постоянном значении $B = 550$ мм рт. ст. (по условию).

Тогда:

$$p^{0,87} = \left(\frac{760 - 550}{735} \right)^{0,87} = 0,336$$

и

$$K = 0,336 \xi(Bp) \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град.} \quad (4)$$

Таблица I

№№ точек	$\tau/\tau_{ц}$	Bp	Δ	t_y	Δt	$\xi(Bp)$	K
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	73,5	5,8	73,4	56,6	40,7	775
2	0,05	76,0	7,2	74,8	55,2	38,6	716
3	0,10	78,4	8,5	76,1	53,9	36,8	666
4	0,15	80,6	9,7	77,3	52,7	35,3	625
5	0,20	82,3	10,6	78,2	51,8	34,2	595
6	0,25	83,5	11,2	78,8	51,2	33,4	575
7	0,30	84,4	11,2	78,8	51,2	32,7	563
8	0,35	85,2	10,9	78,5	51,5	32,0	555
9	0,40	85,9	10,7	78,3	51,7	31,3	543
10	0,45	86,4	10,6	78,2	51,8	30,7	535
11	0,50	87,0	10,7	78,3	51,7	30,0	522
12	0,55	87,6	10,9	78,5	51,5	28,9	500
13	0,60	88,1	11,0	78,6	51,4	27,9	482
14	0,65	88,6	11,3	78,9	51,1	26,7	453
15	0,70	89,1	11,7	79,3	50,7	25,3	431
16	0,75	89,5	12,0	79,6	50,4	24,2	410
17	0,80	90,0	12,4	80,0	50,0	22,5	378
18	0,85	90,5	12,9	80,5	49,5	20,8	346
19	0,90	91,0	13,4	81,0	49,0	19,0	313
20	0,95	91,5	13,9	81,5	48,5	17,3	282
21	1,00	92,0	14,5	82,1	47,9	15,5	250

Результаты расчета показывают, что коэффициент теплопередачи уменьшается к концу варки, и это изменение связано с происходящим в аппарате технологическим процессом посредством величин $\xi(Bp)$ и Δ .

ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА И ПОВЕРХНОСТЬ НАГРЕВА

Поверхность нагрева вакуум-аппарата как теплообменника с периодическим процессом находится из выражения:

$$F \tau_u = \int_0^Q \frac{dQ}{K \Delta t} \text{ м}^2 \cdot \text{час}, \quad (5)$$

где:

 F — поверхность нагрева, в m^2 , τ_u — время варки, в часах, Q — тепловая нагрузка аппарата, в ккал.

Операцию интегрирования, при достаточно большом числе членов суммы n , можно заменить для практического расчета суммированием:

$$F\tau_u = \sum_1^n \frac{\Delta Q}{K_{cp} \Delta t_{cp}}, \quad (6)$$

где коэффициенты теплопередачи K_{cp} и расчетные разности температур Δt_{cp} усреднены за время $\Delta\tau$. Иначе можно записать так:

$$F(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \dots + \Delta\tau_i + \dots + \Delta\tau_n) = \sum_1^n \frac{\Delta Q}{K_{cp} \Delta t_{cp}}. \quad (7)$$

Здесь сумма $\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \dots + \Delta\tau_i + \dots + \Delta\tau_n = \tau_u$; для любого i -го отрезка времени $\Delta\tau_i$:

$$F \Delta\tau_i = \frac{\Delta Q_i}{K_{cp_i} \Delta t_{cp_i}}, \quad (8)$$

где K_{cp} и Δt_{cp} усреднены за время $\Delta\tau_i$.

При равенстве принятых для расчета отрезков времени (т. е. при $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \dots = \Delta\tau_i = \dots = \Delta\tau_n$):

$$\frac{\Delta Q_1}{K_{cp_1} \Delta t_{cp_1}} = \frac{\Delta Q_2}{K_{cp_2} \Delta t_{cp_2}} = \dots = \frac{\Delta Q_n}{K_{cp_n} \Delta t_{cp_n}}. \quad (9)$$

Отсюда получаем, на основании свойств пропорций:

$$Q_i = \frac{K_i \Delta t_i}{\sum_1^n K \Delta t} \sum_1^n Q. \quad (10)$$

а так как количество затраченного тепла, в первом приближении, пропорционально количеству выпаренной воды, то для любого отрезка времени:

$$w_i = \frac{K_i \Delta t_i}{\sum_1^n K \Delta t} \sum_1^n w = \frac{K_i \Delta t_i}{\sum_1^n K \Delta t} \sum W_k. \quad (11)$$

Очевидно, при расчете надо распределить выпариваемую воду ($\sum W_k = 4050$ кг) по соотношению (11).

Расчет производим в таблице 2.

В графы таблицы 2 последовательно записываем:

1. Порядковый номер периода цикла.

2. Относительное время от начала варки, для которого произведено усреднение коэффициентов теплопередачи и разности температур

в пределах отрезка времени $0,05 \frac{\tau}{\tau_u}$.

Таблица 2

№№ пер.	$\frac{\tau}{\tau_u}$	K_{cp}	Δt_{cp}	$K_{cp} \Delta t_{cp}$	$\sum_1^i K_{cp} \Delta t_{cp}$	$\frac{K_i \Delta t_i}{\sum K \Delta t}$	w_i	ΔQ_i	$\frac{\Delta Q_i}{K_i \Delta t_i}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,025	745,5	55,9	41 700	41 700	0,0804	325,5	182 400	4,37
2	0,075	691	54,5	37 700	79 400	0,0727	294,5	164 500	4,37
3	0,125	645,5	53,3	34 400	113 800	0,0664	269	150 500	4,38
4	0,175	610	52,2	31 850	145 650	0,0614	248,5	139 000	4,36
5	0,225	585	51,5	30 150	175 800	0,0582	235,5	131 500	4,36
6	0,275	569	51,2	29 150	204 950	0,0562	227,5	127 000	4,36
7	0,325	559	51,3	28 700	233 650	0,0554	224,5	125 500	4,37
8	0,375	549	51,6	28 350	262 000	0,0547	221,5	124 000	4,37
9	0,425	539	51,7	27 900	289 900	0,0538	218	122 000	4,37
10	0,475	528,5	51,7	27 350	317 250	0,0528	214	120 000	4,39
11	0,525	511	51,6	26 350	343 600	0,0508	206	115 500	4,39
12	0,575	491	51,4	25 250	368 850	0,0487	197,5	110 500	4,38
13	0,625	470,5	51,2	24 150	393 000	0,0466	188,5	105 500	4,37
14	0,675	445	50,9	22 800	415 800	0,0440	178	99 700	4,37
15	0,725	420,5	50,5	21 250	437 050	0,0417	166	93 000	4,37
16	0,775	394	50,2	19 780	456 830	0,0382	154,5	86 300	4,37
17	0,825	362	49,7	18 000	474 830	0,0347	140,5	78 400	4,36
18	0,875	329,5	49,2	16 230	491 060	0,0313	127	71 200	4,39
19	0,925	297,5	48,7	14 500	505 560	0,0280	113,5	63 300	4,37
20	0,975	266	48,2	12 830	518 390	0,0247	100	56 000	4,37
				Сумма	518 390	1,0000	4050		87,50

3. Среднее арифметическое значение коэффициентов теплопередачи для равных отрезков времени $\Delta\tau = 0,05 \frac{\tau}{\tau_u}$. Вычисляется по данным таблицы 1.

4. Среднее значение полезной разности температур, по данным таблицы 1, для тех же отрезков времени.

5. Произведение $K_{cp} \Delta t_{cp}$ для тех же отрезков времени.

6. Сумма величин $K_{cp} \Delta t_{cp}$ нарастающим итогом; в окончательном итоге имеем $\sum_1^{20} K_{cp} \Delta t_{cp} = 518 390$.

7. Отношение чисел графы 5 к $\sum_1^{20} K_{cp} \Delta t_{cp} = 518 390$.

8. Количество воды, выпаренной за равные отрезки времени $\Delta\tau = 0,05 \frac{\tau}{\tau_u}$, по формуле (11).

9. Количество тепла, затраченное на испарение воды за время $\Delta\tau$, по формуле

$$\Delta Q_i = 560 w_i \text{ ккал}, \quad (12)$$

где 560 ккал/кг — приближенное значение тепла испарения.

10. Значения $\frac{\Delta Q_i}{K_i \Delta t_i}$ для каждого равного отрезка времени; в принципе эти значения должны быть равны для всех периодов цикла;

Таблица 3

№ п/п	$\frac{c}{\tau_n}$	γ_{ii}	$\frac{\gamma_{ii}-1}{\gamma_{ii}}$	$\frac{\gamma_{in}}{\gamma_{ii}}$	$S_{нач i}$	w'_i	w''_i	ΔS_n	ΣS_i	$S_{кон i}$	$S_{\gamma i}$	ΣS^0	ΣS_n	Σw_i
1	0,05	0,760	0,967	—	10 630,0	325,5	—	—	10 630,0	10 304,5	7 810	10 630	—	325,5
2	0,10	0,784	0,9695	—	10 304,5	294,5	—	—	10 304,5	10 035,0	7 810	10 630	—	620,0
3	0,15	0,806	0,973	—	10 035,0	269,5	—	—	10 035,0	9 886,5	7 810	10 630	—	889,0
4	0,20	0,823	0,979	—	9 886,5	248,5	—	—	9 886,5	9 492,5	7 810	10 630	—	1 137,5
5	0,25	0,835	0,9855	0,8805	9 492,5	137,5	98,0	817,0	10 309,5	10 074,0	8 410	11 447	817	1 373,0
6	0,30	0,844	0,989	0,8710	10 074,0	106,0	121,5	942,0	11 016,0	10 788,5	9 105	12 389	1 759	1 600,5
7	0,35	0,852	0,991	0,8630	10 788,5	97,0	127,5	931,0	11 719,5	11 495,0	9 790	13 320	2 690	1 825,0
8	0,40	0,859	0,9915	0,856	11 495,0	92,0	129,5	893,0	12 388,0	12 166,5	10 450	14 213	3 583	2 046,5
9	0,45	0,864	0,9945	0,851	12 166,5	73,0	145,0	973,0	13 139,5	12 921,5	11 160	15 186	4 556	2 264,5
10	0,51	0,870	0,993	0,845	12 921,5	90,5	123,5	797,0	13 718,5	13 504,5	11 750	15 983	5 353	2 478,5
11	0,55	0,876	0,993	0,839	13 504,5	94,5	111,5	692,5	14 197,0	13 991,0	12 250	16 675,5	6 045,5	2 684,5
12	0,60	0,881	0,994	0,8345	13 991,0	84,0	113,5	686,0	14 677,0	14 479,5	12 750	17 361,5	6 731,5	2 882,0
13	0,65	0,886	0,994	0,8295	14 479,5	87,0	101,5	595,0	15 074,5	14 886,0	13 190	17 956,5	7 326,5	3 070,5
14	0,70	0,891	0,994	0,825	14 886,0	89,5	88,5	505,5	15 391,5	15 213,5	13 550	18 462	8 732	3 248,5
15	0,75	0,895	0,995	0,821	15 213,5	76,0	60,0	503,0	15 716,5	15 550,5	13 950	18 965	8 835	3 414,5
16	0,80	0,900	0,9945	0,817	15 550,5	85,5	69,0	377,0	15 927,5	15 773,0	14 200	19 342	8 712	3 569,0
17	0,85	0,905	0,9945	0,8125	15 773,0	65,5	75,0	400,0	16 173,0	16 033,5	14 500	19 742	9 112	3 709,5
18	0,90	0,910	0,9945	0,8075	16 033,5	67,7	59,3	308,0	16 341,5	16 214,5	14 750	20 050	9 420	3 836,5
19	0,95	0,915	0,9945	—	16 214,5	113,5	—	—	16 214,5	16 101,0	14 750	20 050	—	3 950,0
20	1,00	0,920	0,995	—	16 101,0	100,0	—	—	16 101,0	16 001,0	14 750	20 050	—	4 050,0

Количество воды, выпаренной до заковки кристаллов:

$$\Sigma W_4 = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 325,5 + 294,5 + 269 + 248,5 = 1137,5 \text{ кг.}$$

Сгущение производится от $\gamma_{in} = 0,735$ до $\gamma_4 = 0,823$; начальная загрузка сиропа будет:

$$S_n = \frac{1137,5}{1 - \frac{0,735}{0,823}} = 10 630 \text{ кг, или } \frac{10 630 \cdot 100}{20 050} = 53\%$$

общего количества увариваемого сиропа.

Общее количество подкачек:

$$\Sigma S_n = \Sigma S - S_n = 200 050 - 10 630 = 9 420 \text{ кг.}$$

Расчет для пятого периода цикла $\left(0,25 \frac{\tau}{\tau_{ii}}\right)$

К началу периода поступает сиропа:

$$S_4 = S_n - \frac{4}{1} w = 10 630 - 1 137,5 = 9 492,5 \text{ кг.}$$

Концентрация этого сиропа $\gamma_{ii} = 0,823$, увариваем до $\gamma_{is} = 0,835$. Выпаривается воды за пятый период цикла $w_5 = 235,5 \text{ кг}$, в том числе:

а) из сиропа, находящегося в аппарате:

$$w'_5 = S_4 \left(1 - \frac{\gamma_{ii}}{\gamma_{is}}\right) = 9 492,5 \left(1 - \frac{0,823}{0,835}\right) = 137,5 \text{ кг,}$$

б) из подкачки — остальное количество:

$$w''_5 = w_5 - w'_5 = 235,5 - 137,5 = 98 \text{ кг.}$$

Количество подкачки при концентрации, равной начальной концентрации сиропа (при $\gamma_{in} = \gamma_{ii}$):

$$\Delta S_{n5} = \frac{w''_5}{1 - \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{is}}} = \frac{98}{1 - \frac{0,735}{0,835}} = 817 \text{ кг.}$$

Всего за пятый период уваривается в аппарате:

$$\Sigma S_5 = S_4 + \Delta S_{n5} = 9 492,5 + 817 = 10 309,5 \text{ кг.}$$

Количество увариваемой массы к концу пятого периода:

$$S_5 = \Sigma S_5 - w_5 = 10 309,5 - 235,5 = 10 074,0 \text{ кг.}$$

Сухие вещества этой массы:

$$S_5 \gamma_{is} = 10 074 \cdot 0,835 = 8 410 \text{ кг.}$$

Использовано исходного сиропа:

$$\Sigma S^0_5 = S_n + \Delta S_{n5} = 10 630 + 817 = 11 447 \text{ кг.}$$

Сумма выпаренной воды:

$$\Sigma W_5 = \Sigma W_4 + w_5 = 1 137,5 + 235,5 = 1 373 \text{ кг.}$$

Расчет для шестого периода цикла $\left(0,30 \frac{\tau}{\tau_n}\right)$

Количество увариваемой массы к началу шестого периода:

$$S_5 = 10\,074 \text{ кг.}$$

Концентрация массы $\gamma_{16} = 0,835$, уваривание до $\gamma_{16} = 0,844$.

Выпаривается воды за шестой период $w_6 = 227,5$ кг, в том числе:

а) из массы:

$$w'_6 = S_5 \left(1 - \frac{\gamma_{16}}{\gamma_{16}}\right) = 10\,074 \left(1 - \frac{0,835}{0,844}\right) = 106 \text{ кг,}$$

б) из подкачки: $w''_6 = w_6 - w'_6 = 121,5$ кг.

Количество подкачки:

$$\Delta S_{n_6} = \frac{w''_6}{1 - \gamma_{16}/\gamma_{16}} = \frac{121,5}{1 - \frac{0,735}{0,844}} = 942 \text{ кг.}$$

За шестой период уваривается:

$$\Sigma S_6 = S_5 + \Delta S_{n_6} = 10\,074 + 942 = 11\,016 \text{ кг.}$$

Количество увариваемой массы к концу периода:

$$S_6 = \Sigma S_6 - w_6 = 11\,016 - 227,5 = 10\,788,5 \text{ кг.}$$

Сухие вещества этой массы:

$$S_6 \gamma_{16} = 10\,788,5 \cdot 0,844 = 9\,105 \text{ кг.}$$

Использовано исходного сиропа:

$$\Sigma S_6^0 - \Sigma S_5^0 + \Delta S_{n_6} = 11\,447 + 942 = 12\,389 \text{ кг.}$$

Сумма выпаренной воды:

$$\Sigma W_6 = \Sigma W_5 + w_6 = 1373 + 227,5 = 1600,5 \text{ кг.}$$

Для остальных периодов цикла расчет аналогичен и дается в таблице 3. Для семнадцатого и восемнадцатого периодов величины w' , w'' и ΔS_n определены по балансу суммы подкачек. Незначительной невязкой концентраций и материального баланса пренебрегаем.

Таким образом, на основании расчета определена продолжительность периодов варки:

1 период до заковки кристаллов $-0,2\tau/\tau_n$ или 16 минут,

2 период варки при подкачках $-0,7\tau/\tau_n$ или 56 минут,

3 период отваривания $-0,1\tau/\tau_n$ или 8 минут.

Результаты расчета изображены на графике процесса (рис.). Отметим, что, располагая данными таблиц 1 и 2, возможно обойтись без расчета таблицы 3, определяя режим подкачек непосредственно по графику процесса. Для этого надо сначала построить линии S и $S\gamma$ в пределах первого и третьего периодов варки на основании материального баланса. Затем строятся кривые S и $S\gamma$ для второго пе-

риода, с использованием закона изменения общей концентрации и соотношения ординат этих кривых $\frac{S\gamma}{S} = \gamma$ для любого момента варки.

Построив кривую S и откладывая от нее вверх соответствующие суммы выпаренной воды, находим кривую S_n [2].

Здесь приведен один из возможных вариантов расчета; другие варианты легко уясняются по ознакомлении с изложенной выше расчетной схемой процесса [2, 4].

ВЫВОДЫ

1. На основе результатов испытаний промышленных аппаратов разработана методика приближенного теплового расчета уфельных вакуум-аппаратов.

2. Особенностью методики является совместное рассмотрение явлений теплообмена и кристаллизации во времени варки.

3. Показан пример расчета вакуум-аппарата по предложенному методу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сталин И. В. О диалектическом и историческом материализме, стр. 5, 1948.
2. Попов В. Д. К вопросу о тепловом расчете вакуум-аппаратов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
3. Попов В. Д. К вопросу о тепловом расчете вакуум-аппаратов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 10.
4. Головин П. В., Попов В. Д. Приближенный расчет уфельного вакуум-аппарата непрерывного действия, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
5. Попов В. Д. Некоторые данные о теплообмене в уфельных вакуум-аппаратах первого продукта, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
6. Попов В. Д. Коэффициенты теплопередачи в рафинадных вакуум-аппаратах, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.
7. Демчук Г. С., Попов В. Д. Депрессия при варке рафинадного уфеля, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.

(Получена редакцией 11 февраля 1952 г.)

Доц. ПОПОВ В. Д.,
кандидат технических наук

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РАФИНАДНЫХ ВАКУУМ-АППАРАТАХ

(Кафедра процессов и аппаратов)

В 1951 г. на Одесском рафинадном заводе нами испытывался вакуум-аппарат для варки утфеля II рафинада. Основная задача испытаний состояла в получении опытных данных о коэффициентах теплопередачи. Накопление этих данных для аппаратов разных типов при варке различных продуктов необходимо для последующего обобщения в виде критериальных уравнений и расчетных формул, из которых коэффициент теплопередачи мог бы определяться для любых конкретных условий варки.

Известно, что на данном этапе исследования теплообмена в утфельных вакуум-аппаратах мы не располагаем обобщенными, критериальными уравнениями; получаемые зависимости носят еще частный характер. Так, нами была получена приближенная расчетная формула [1], пригодная только для аппаратов с подвесной камерой в условиях варки утфеля I продукта сахаропесочного производства. К аналогичной, несколько более совершенной, частной формуле приходим в результате обработки опытов на Одесском заводе.

Не касаясь деталей методики и обработки опытов, опишем вкратце схему измерений (рис. 1). Испытанный аппарат имеет три типа поверхности нагрева: подвесную камеру, змеевик и нижний конус с паровой рубашкой. Общая поверхность нагрева составляет 75,3 кв. м, из них на подвесную камеру приходится 62,6 кв. м. Конденсат греющего пара от каждой поверхности нагрева, раздельно или совместно, мог поступать через водоотводчик 4 в измерительные сборники 6—7. Приводимые ниже данные относятся только к подвесной камере, испытанной при выключенном змеевике. Тепловой поток определялся по количеству конденсата; самоиспарение учитывалось по формулам и контролировалось с помощью гидравлического затвора с холодной водой 8.

Кроме количества конденсата в опытах измерялись: температура и давление греющего пара, температура утфеля и вторичного пара, температура конденсата при выходе из камеры (места измерений показаны на схеме), разрежение в аппарате, количество сиропа, идущего на набор и подкочки, температура сиропа. Температуры измерялись с помощью термометрами, со шкалами в 0,5 мв и 11 мв. Запись показаний приборов производилась каждые 5 минут от начала варки; каждые 5—10 минут из аппарата отбирались пробы утфеля для анализа общей концентрации, доброкачественности и содержания твердой фазы. Всего было проведено 40 опытных варок, которые дали около 600 значений коэффициентов тепло-

передачи при различных концентрациях увариваемой массы и тепловых потоках от 8 000 до 35 000 ккал/м² час.

Произведенные опыты дают возможность установить закономерности в изменении общей концентрации, тепловой нагрузки, депрессии, режима подкачек и коэффициентов теплопередачи в процессе варки.

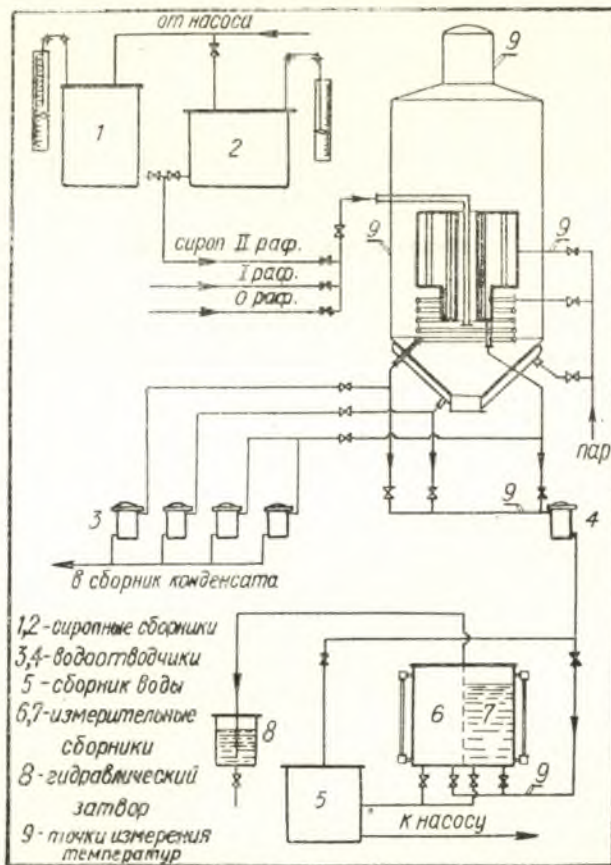


Рис. 1.

В дальнейшем изложении, поскольку $K \approx \alpha_2$, величина α_1 — коэффициент теплоотдачи от пара к стенке — из анализа результатов временно исключается; выводы относятся к общему коэффициенту теплопередачи, но приближенно переносятся на коэффициент теплоотдачи от стенки к утфелю α_2 .

Результаты обработки опытов по определению коэффициента теплопередачи представлены на рис. 2 в логарифмических координатах. На этом рисунке показано, как изменяются коэффициенты теплопередачи в зависимости от теплового потока. Преобладающее количество опытных точек располагается в сравнительно узкой полосе между пунктирными линиями; закономерность характеризуется средней сплошной линией с угловым коэффициентом 0,894.

Уравнение этой линии:

$$K = 0,0582 q^{0,894}, \quad (1)$$

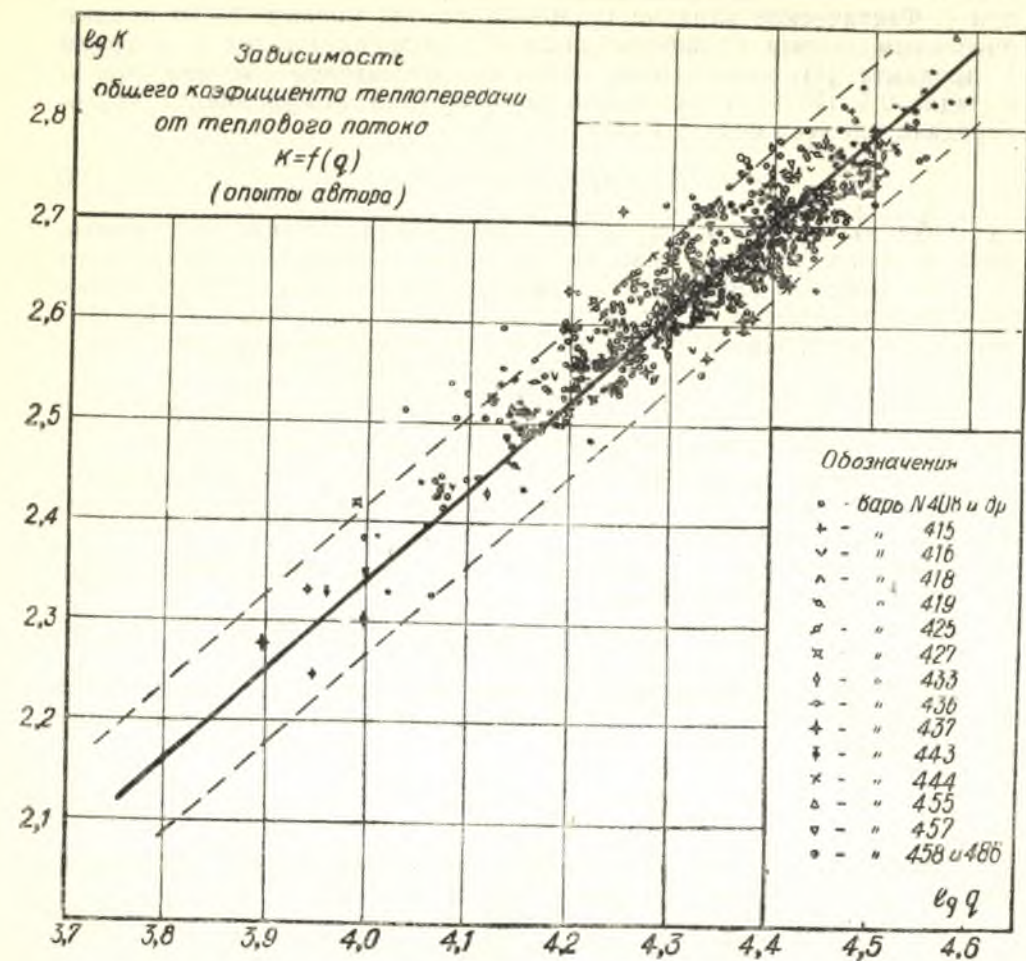


Рис. 2.

где:

K — общий коэффициент теплопередачи, в ккал/м² · час · град,

q — тепловой поток, в ккал/м² · час.

Точки, нанесенные на рис. 2, относятся к различным концентрациям и разным давлениям. Если путем построения отдельного графика выделить влияние давления, то получим:

$$K = 0,1011 p^{0,435} q^{0,894}, \quad (2)$$

где:

$$p = \frac{760 - B}{735} \text{ — давление вторичного пара, в кг/см}^2,$$

B — действительное разрежение в аппарате (с поправкой на величину атмосферного давления по барометру), в мм рт. ст.

Влияние концентрации и других факторов заключено не только в цифровом множителе уравнения (2), но и в показателе степени

при q . Фактическое влияние теплового потока меньше, и, по предварительным данным из лабораторных и заводских опытов с утфелем I продукта [1], может быть оценено показателем степени при q порядка 0,5. Поэтому расчетную формулу для коэффициента теплопередачи следует искать в виде:

$$K = f(Bp, q) p^{0,435} q^{0,5}, \quad (3)$$

где $f(Bp, q)$ — некоторая функция, отражающая влияние ряда факторов: наличия твердой фазы в растворе, затопления поверхности нагрева, эффективной вязкости утфеля и др. Поскольку влияние этих факторов изменяется вместе с ростом общей концентрации, то временно, до раздельного исследования этих факторов, положим, что

$$K = \xi^{0,5}(Bp) p^{0,435} q^{0,5}, \quad (4)$$

где $\xi(Bp)$ — некоторая функция общей концентрации.

Показатель степени при ξ , равный 0,5, принят в целях удобства дальнейшего преобразования уравнения (4), чтобы получить ξ в первой степени в уравнении (5).

Заменяя $q = K\Delta t$, где $\Delta t = t_s - t_y$ — разность температур греющего пара и утфеля, получаем:

$$K = \xi(Bp) p^{0,87} \Delta t. \quad (5)$$

Проверка степени влияния давления и формулы (2) производится следующим образом. На рис. 3 нанесены опытные точки, вычисленные по уравнению:

$$\xi^{0,5}(Bp) = \frac{K}{p^{0,435} q^{0,5}}. \quad (6)$$

Очевидно, опытные данные должны удовлетворять уравнению, получаемому из сравнения формул (2) и (4):

$$0,1011 p^{0,435} q^{0,891} = \xi^{0,5}(Bp) p^{0,435} q^{0,5},$$

откуда

$$\xi^{0,5}(Bp) = 0,1011 q^{0,394}. \quad (7)$$

Кривая по уравнению (7) также нанесена на рис. 3. Как видим, опытные точки удовлетворительно группируются вблизи этой кривой. Кроме наших опытных точек, на рис. 3 для области больших тепловых потоков ($q = 35\,000 - 100\,000$ ккал/м² · час) нанесены точки по обработанным нами опытам КПИ [2]. Несмотря на условность сравнения, расположение этих точек на графике в общем подтверждает полученную зависимость вида (2).

Для расчета коэффициента теплопередачи по формулам (4) и (5) надо найти конкретные значения $\xi(Bp)$ в зависимости от общей концентрации увариваемой массы, усреднив влияние теплового потока на физические константы массы и ее гидромеханические свойства. Воздействие теплового потока, вероятно, проявляется в связи с перепадом температур в пограничном слое увариваемой массы и различным ее паросодержанием. Этот вопрос нуждается в особом изучении; на данном этапе работы возможно только приближенное усреднение, которое мы произвели,

пользуясь установленной из опытов закономерностью изменения тепловой нагрузки и номографическим приемом совмещения двух графиков с общей координатной осью.

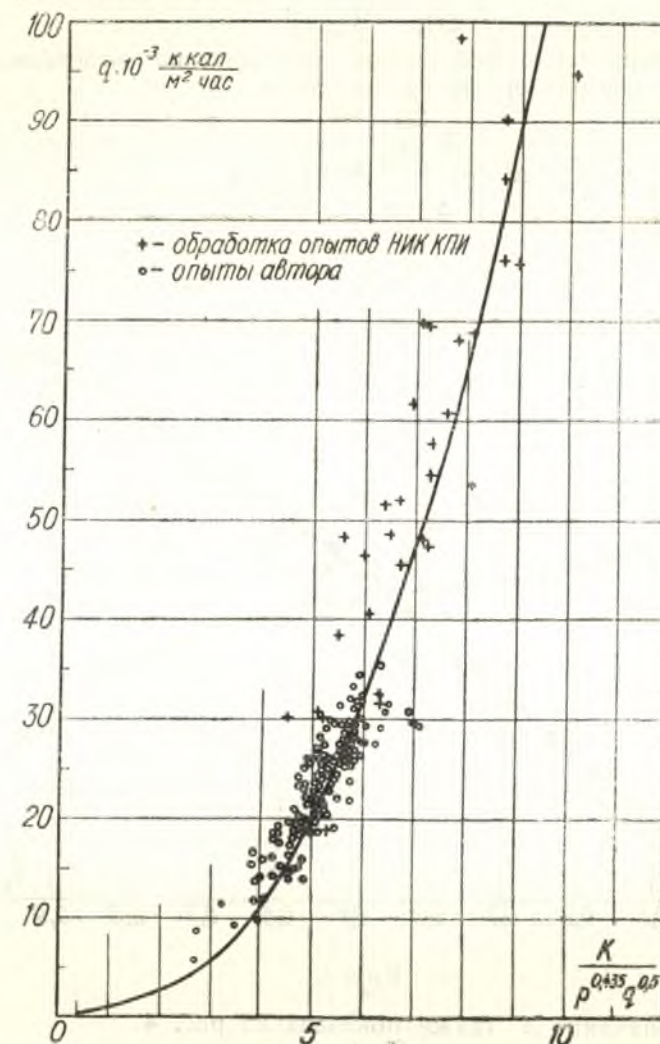


Рис. 3.

Закономерность изменения тепловой нагрузки во времени варки получаем, изображая в относительных координатах изменение суммы выпаренной воды (рис. 4). Горизонтальная ось графика — относительное время варки $\frac{\tau}{\tau_{ц}}$, где τ — время от начала варки, $\tau_{ц}$ — время цикла (полное активное время варки). Вертикальная ось — относительная сумма выпаренной воды $\frac{\Sigma G}{\Sigma G_{к}}$, где:

ΣG — сумма выпаренной воды к моменту времени τ ,

$\Sigma G_{к}$ — общее количество выпаренной воды за время $\tau_{ц}$.

На график нанесены опытные точки и по ним проведена усредняющая кривая функции:

$$\frac{\Sigma G}{\Sigma G_k} = f\left(\frac{\tau}{\tau_u}\right). \quad (8)$$

Дифференцирование этой кривой дает значение мгновенной тепловой нагрузки — безразмерную производную:

$$\Delta' = \frac{\Delta \frac{\Sigma G}{\Sigma G_k}}{\Delta \frac{\tau}{\tau_u}} = \varphi\left(\frac{\tau}{\tau_u}\right). \quad (9)$$

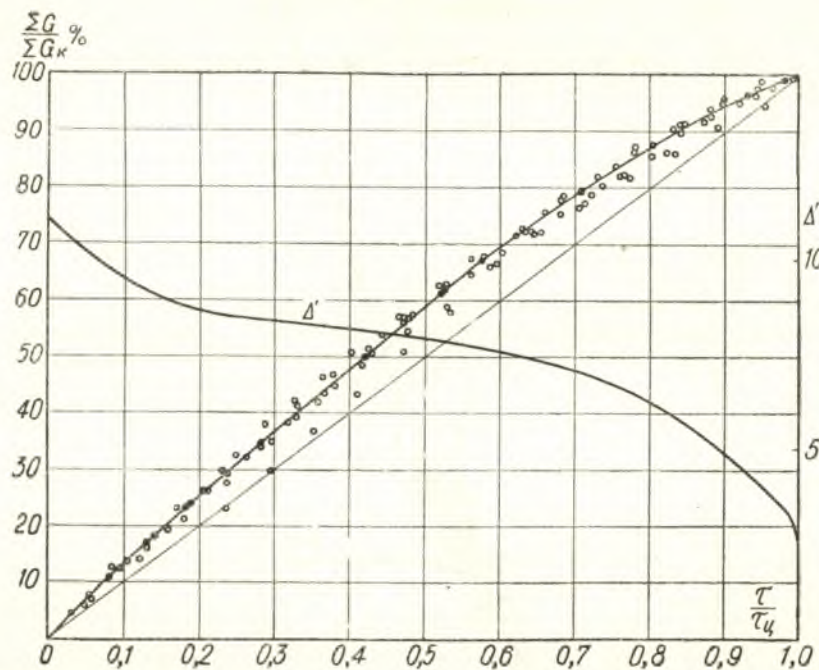


Рис. 4.

Кривая значений Δ' также показана на рис. 4.

Остается связать изменение Δ' с изменением общей концентрации в процессе варки.

На основании анализа отобранных во время опытов проб получаем рис. 5, на котором изображены опытные точки и усредняющая кривая, показывающая, как изменяется общая концентрация увариваемой массы во времени варки. Сравнивая графики рис. 4 и рис. 5, имеющие общую координатную ось — относительное время варки, легко находим кривую зависимости:

$$\Delta' = f(Bp), \quad (10)$$

которая и представлена на рис. 6 (стр. 120).

Кривая имеет характерную выпуклость в области концентраций от 83 до 91%, объясняемую особенностями в изменении физических свойств увариваемой массы. С момента заковки кристаллов наблюдается за-

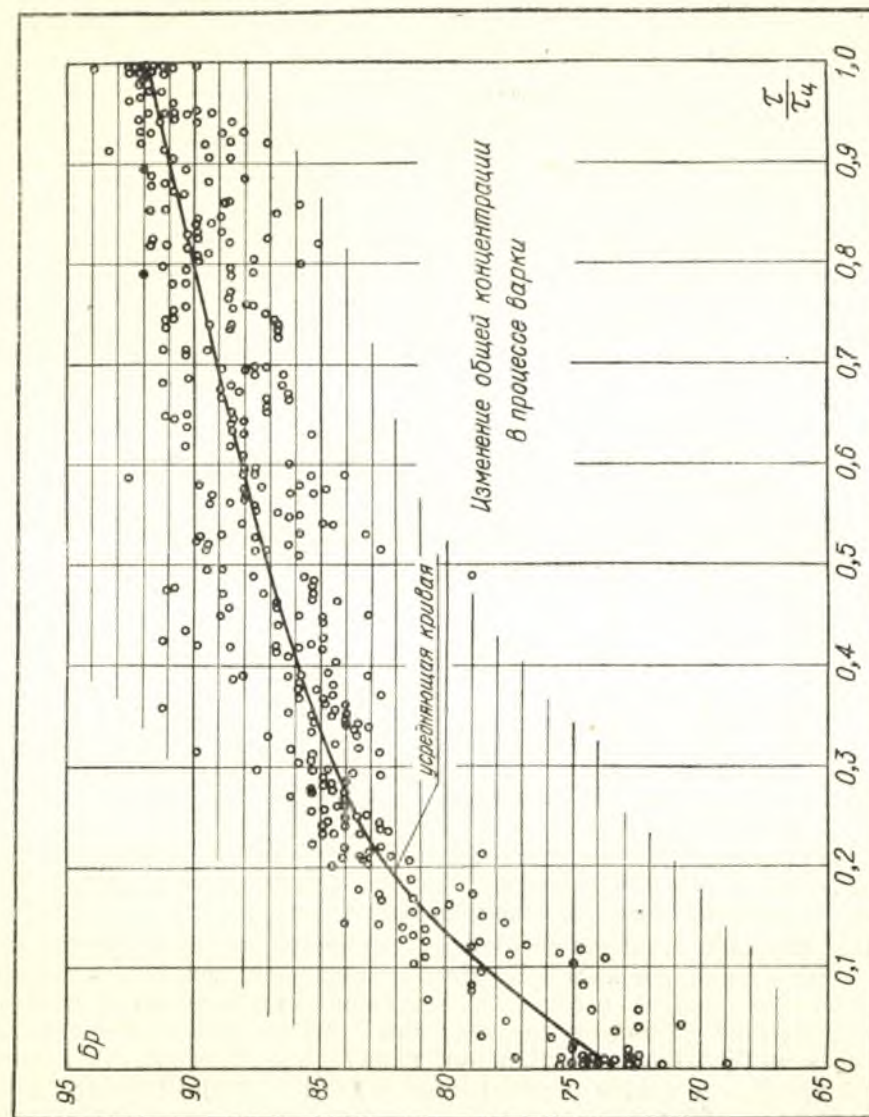


Рис. 5.

медленное изменение теплового потока, так как свойства утфеля в течение некоторого периода времени в основном определяются почти постоянными физическими константами межкристального сиропа. В дальнейшем рост кристаллов и повышение уровня утфеля более резко изменяют гидродинамику потока, и тепловой поток падает. Особенно резкое падение наблюдается при $Bp=90-91$, когда кристаллы приходят в соприкосновение и наступает структурное течение утфеля.

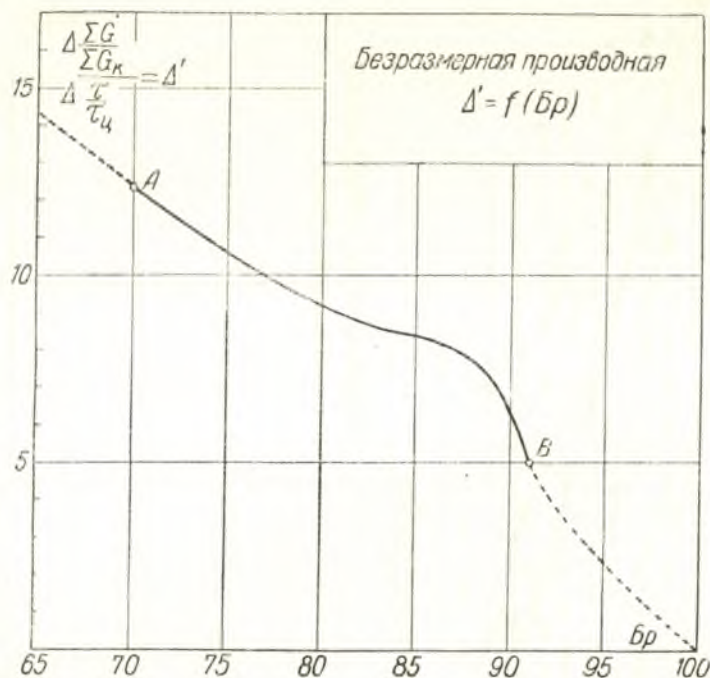


Рис. 6.

Кривая на рис. 6 экстраполирована в обе стороны от исследованного интервала AB до $Bp=100$ (когда кипение уже невозможно) и до $Bp=65$. Пунктир на рисунке, конечно, проведен ориентировочно.

Зная характер изменения теплового потока в зависимости от общей концентрации, находим $\xi^{0.5}(Bp)$, совмещая графики в координатах $\xi^{0.5}(Bp) - q$ и $Bp - q$ (рис. 7). В правом квадранте по опытным точкам проведена кривая в соответствии с рис. 6, в левом — кривая по уравнению (7). Перенос на левую кривую значения концентрации с правой кривой, получаем совмещенные шкалы величин $\xi^{0.5}(Bp)$ и Bp . Построенный в большем масштабе график позволяет изобразить результат в виде номограммы (рис. 8), по которой находят $\xi(Bp)$ и $\xi^{0.5}(Bp)$. На том же рис. 8 (стр. 122) дана номограмма для расчета $p^{0.435}$ по заданному разрежению. Значения $p^{0.87}$ находятся с помощью той же номограммы, так как $p^{0.87} = (p^{0.435})^2$.

Таким образом, результаты опытов могут быть представлены, в зависимости от задач расчета, следующими расчетными формулами:

а) для проектных расчетов:

$$K = \xi(Bp) p^{0.87} \Delta t \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}, \quad (5)$$

б) для проверочных расчетов:

$$K = \xi^{0.5}(Bp) p^{0.435} q^{0.5} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град} \quad (6)$$

или, заменяя $q=ur$ (u в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{час}$ — весовое напряжение, r в ккал/кг — тепло испарения):

$$K = 23,2 \xi^{0.5}(Bp) p^{0.435} u^{0.5} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град} \quad (11)$$

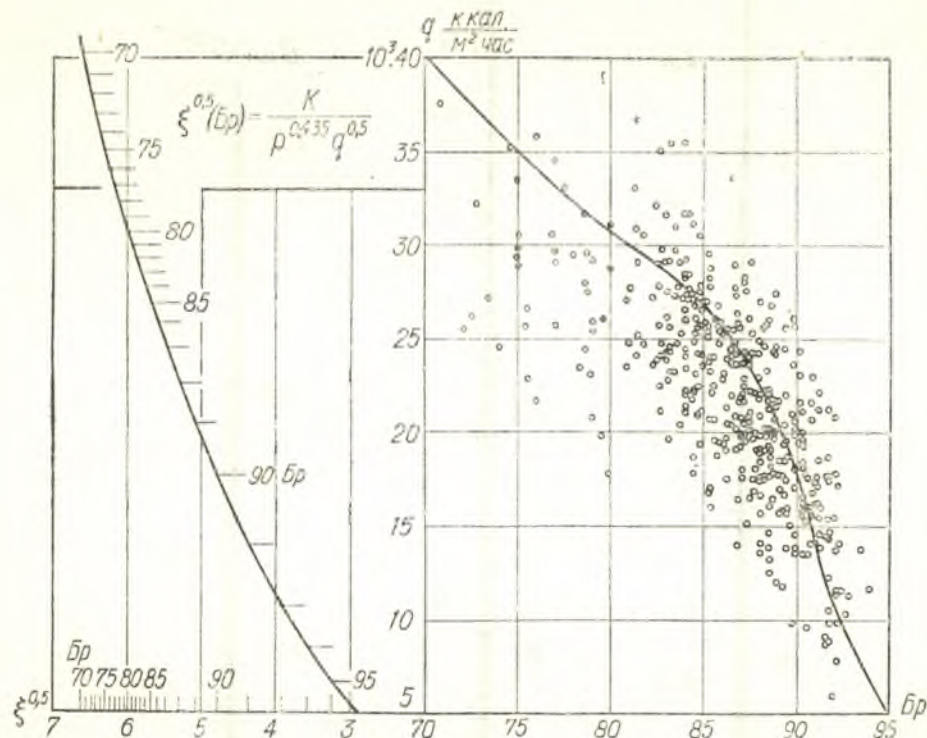


Рис. 7.

Формулы рекомендуются для расчета коэффициентов теплопередачи в рафинадных вакуум-аппаратах с подвесной камерой при варке утфеля II рафинада в качестве временных частных формул до получения обобщенных зависимостей.

В заключение отметим, что абсолютные значения K в рафинадных аппаратах оказываются меньше, чем в вакуум-аппаратах при варке I продукта сахаропесочного производства. Повидимому, это объясняется тем, что вязкость чистого сахарного раствора в некоторых пределах выше вязкости нечистого раствора при том же общем содержании сухих веществ. Это обстоятельство требует еще тщательного изучения.

Для сравнения приводим также рис. 9 (стр. 123), на котором нанесены:

- опытные точки по испытаниям на Одесском заводе,
- наша обработка опытов КПИ на Дерюгинском заводе (змеиный рафинадный аппарат),
- наша обработка опытов ЦИНС (Москва) на Елань-Коленовском заводе (аппарат I продукта с подвесной камерой),

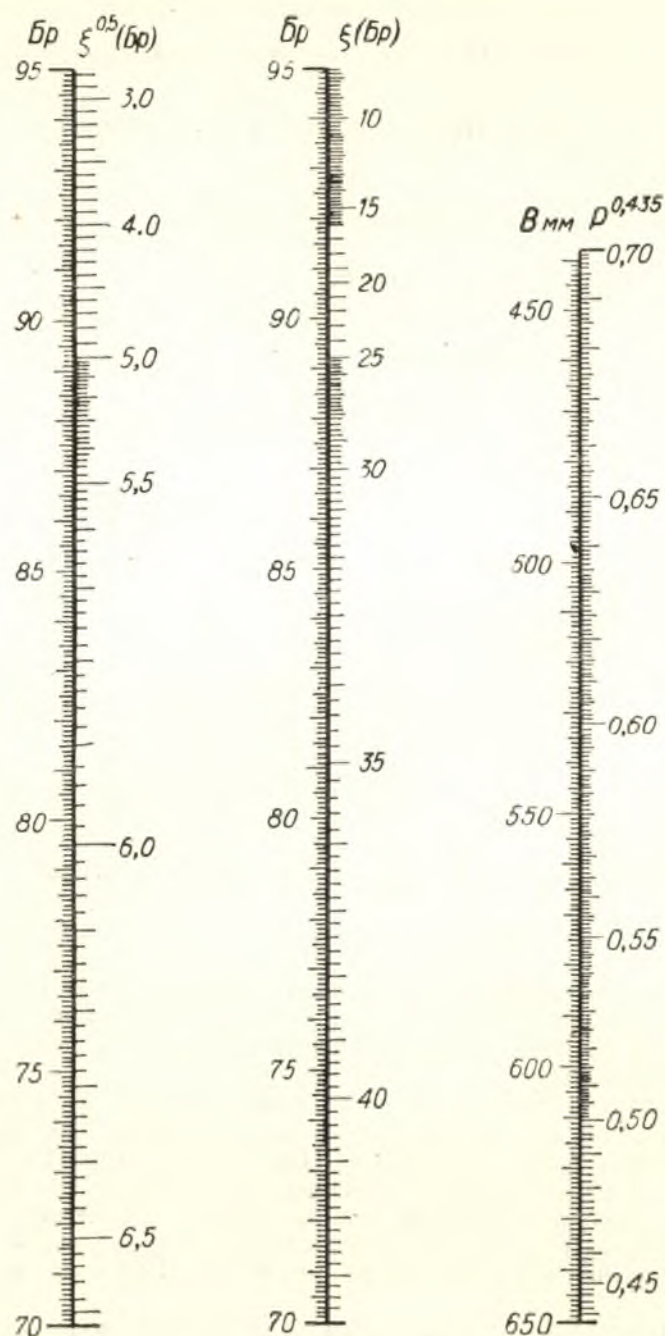


Рис. 8.

г) расчет по нашей формуле для аппаратов I продукта с подвесной камерой,

д) значения коэффициентов теплопередачи в вакуум-аппаратах при варке I—II рафинада, рекомендованные в качестве временных норм Кичигиным М. А. [3].

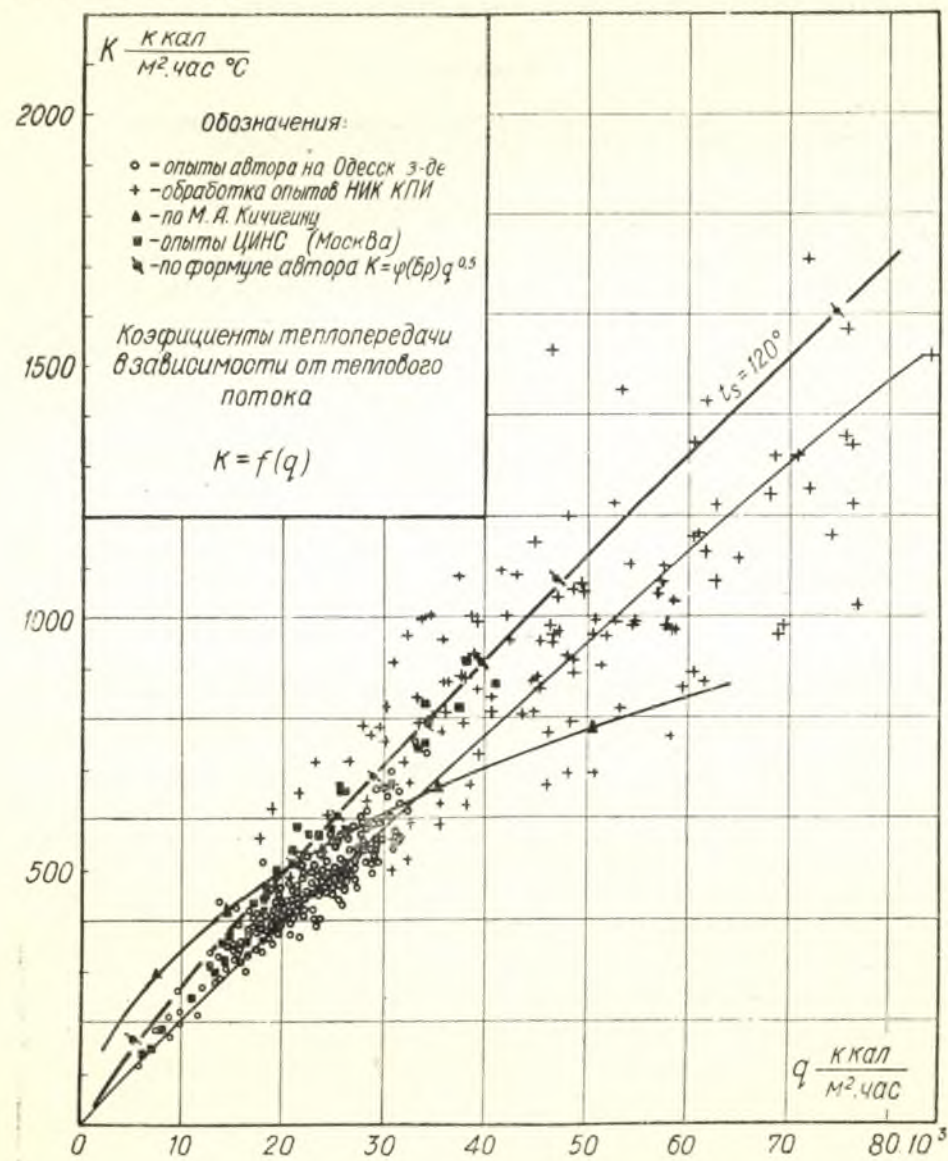


Рис. 9.

Из такого ориентировочного и пока условного сравнения можно заключить, что имеющиеся данные еще не дают основания для выделения влияния геометрического фактора в расчетных формулах; коэффициенты теплопередачи для змеевикового аппарата имеют тот же порядок величин, что и для подвесных камер. Между тем, в силу различных гид-

родинамических условий, различие должно существовать и его надо установить, проводя систематические промышленные испытания вакуум-аппаратов разных типов при варке различных продуктов и лабораторные опыты с различными элементами поверхности нагрева. В настоящее время проедится испытание промышленного змеевикового аппарата, результаты которого будут изложены в отдельной статье.

Выводы

1. Проведено систематическое исследование закономерностей теплообмена при варке утфеля II рафинада в вакуум-аппарате с подвесной камерой.

2. Установлена закономерность изменения тепловой нагрузки во времени, для средних условий варки.

3. На основе закономерности изменения тепловой нагрузки показан вид функции, отражающий влияние физических свойств утфеля на теплоотдачу.

4. Результаты опытов представлены в виде эмпирических формул для определения общего коэффициента теплопередачи, в зависимости от концентрации увариваемой массы, давления вторичного пара и теплового потока.

5. Установлено, что при равных тепловых потоках коэффициенты теплопередачи при варке рафинадного утфеля ниже, чем для I продукта сахаропесочного производства.

Автор просит читателей направлять в адрес Института критические замечания по изложенному здесь материалу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В. Д. Некоторые данные о теплообмене в утфельных вакуум-аппаратах первого продукта, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.

2. Записки научно-исследовательской кафедры технологии сельскохозяйственных производств КПИ, т. I, 106, 1924.

3. Сборник работ Киевского филиала ЦИНС, 1948.

(Получена редакцией 4 февраля 1952 г.)

Доц. ПОПОВ В. Д.,
кандидат технических наук

ДИАГРАММА ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ И УТФЕЛЯ

(Кафедра процессов и аппаратов)

В развернутой схеме теплового расчета утфельных вакуум-аппаратов [1] фигурируют значения теплосодержания утфеля и подкачиваемого сиропа. Теплосодержание увариваемой массы при расчете вакуум-аппаратов можно вычислить аналитически, зная весовое содержание твердой фазы в утфеле, температуру варки и теплоемкость межкристальной патоки и кристаллов. Эти вычисления громоздки, утомительны и связаны с необходимостью построения ряда графиков величин, изменяющихся в процессе варки.

Известно, что в ряде случаев графические и графоаналитические методы расчета дают неоспоримое преимущество перед аналитическими как по наглядности представления процесса, так по простоте и простоте вычислительных операций. Сошлемся на общезвестную $I-x$ диаграмму Рамзина для расчета сушилок [8], диаграмму $I-\xi$ для абсорбционных холодильных установок [9] и т. д.

Вообще говоря, тепловые диаграммы — не новость; при тепловых расчетах широко применяются различные диаграммы состояния рабочих тел — диаграммы $I-S$, $T-S$ для водяного пара, углекислоты, метана и т. д.

Известны несколько диаграмм для процессов выпаривания [2], нагревания и охлаждения [3] и др. Однако, насколько нам известно, многие из этих диаграмм существуют только в теории.

В 1937 г. была опубликована диаграмма для расчета выпарных станций [7]; для сахарных растворов имеется тепловая диаграмма [4], не учитывающая пересыщения раствора и не соответствующая процессу варки в вакуум-аппарате. Поэтому для наших целей мы вынуждены построить диаграмму теплосодержания, охватывающую область пересыщенных сахарных растворов. Диаграмма построена для чистых растворов по отечественным исходным данным о физических константах сиропа и утфеля. С достаточной точностью диаграмма может быть использована в тепловом расчете утфельных вакуум-аппаратов I продукта сахаропесочного производства.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И СХЕМА ДИАГРАММЫ

Удобство пользования диаграммой в значительной мере определяется удачным выбором координатных осей. Выбирать надо ось абсцисс, ибо во всех случаях построения по оси ординат должна быть искомая величина — теплосодержание увариваемой массы.

Теплосодержание надо выразить в функции концентрации, для характеристики которой не установилось еще единого способа [5]. Действительно, содержание сухих веществ в растворе выражается одной из следующих величин:

1. Весовая концентрация, в процентах, как безводная часть раствора:

$$Br = \frac{G_{\text{сух}}}{G_{\text{раств}}} 100 \text{ кг сух. вещ.} \cdot 100/\text{кг раствора}, \quad (1)$$

где:

$G_{\text{сух}}$ — вес сухих веществ,

$G_{\text{раств}}$ — вес раствора.

2. Весовая концентрация в долях сухих веществ (крепость раствора):

$$\eta = \frac{G_{\text{сух}}}{G_{\text{раств}}} \text{ кг сух. вещ./кг раствора}. \quad (2)$$

3. Содержание растворенного вещества:

$$y = \frac{G_{\text{сух}}}{W} \text{ кг сух. вещ./кг воды}, \quad (3)$$

где W — вес растворителя (воды).

4. Степень разбавления:

$$\varphi = \frac{W}{G_{\text{раств}}} \text{ кг воды/кг раствора}. \quad (4)$$

5. Водосодержание:

$$x = \frac{W}{G_{\text{сух}}} \text{ кг воды/кг сух. вещ.} \quad (5)$$

6. Молярная концентрация:

$$\eta_m = \left(\frac{z}{100 - z} \right) \frac{1000}{342} \text{ молей/кг воды}, \quad (6)$$

где:

z — весовая концентрация сахарозы в процентах:

$$z = \frac{G_{\text{сах}}}{G_{\text{раств}}} 100 \text{ кг сахара} \cdot 100/\text{кг раствора}, \quad (7)$$

342 — молекулярный вес сахарозы.

7. Объемная концентрация сахарозы:

$$C = z\gamma \text{ кг сахара/м}^3 \text{ раствора}, \quad (8)$$

где γ кг/м³ — удельный вес раствора.

Сравнивая различные выражения концентрации, замечаем, что в разных случаях расчета надо применять такие формулы, в которых содержание сухих веществ или влаги отнесено к некоторому постоянному масштабу. Во второй период варки [1] все величины изменяются, и выбор формулы определяется удобством расчета переменного масштаба; при сгущении без подкачек постоянным остается содержание сухих веществ и потому удобнее формула водосодержания.

По аналогии с диаграммой Рамзина и диаграммой Чернобыльского [7], для построения диаграммы чистых сахарных растворов в качестве абсциссы принимаем водосодержание:

$$x = \frac{W}{z} \text{ кг воды/кг сахара}, \quad (9)$$

связанное с концентрацией в процентах и весовой концентрацией в долях следующими соотношениями:

$$x = \frac{100 - Br}{Br} = \frac{1 - \eta}{\eta}; \quad Br = \frac{100}{1 + x}; \quad \eta = \frac{1}{1 + x}. \quad (10)$$

В качестве ординаты принимаем теплосодержание $(1 + x)$ кг увариваемой массы, содержащей 1 кг сахара и x кг воды:

$$I = I_x + xi_w + q(1 + x) \text{ ккал/кг сахара}, \quad (11)$$

где:

I_x ккал/кг сахара — теплосодержание чистого сахара,

i_w ккал/кг воды — теплосодержание растворителя,

q ккал/кг раствора — интегральная теплота смешения — теплота изотермического образования 1 кг раствора.

Величина $q = f(x)$, т. е. зависит от состава раствора.

Ввиду малости q для наших целей используем упрощенную формулу. Располагая формулой Яновского и Архангельского и экстраполируя ее на область пересыщенных растворов [6], теплосодержание раствора представим в следующем виде:

$$I = \frac{C_p \cdot 100}{Br} t = \left\{ 1 - [0,5 - 0,0018t + 0,0011(100 - Db)] \frac{Br}{100} \right\} \frac{100t}{Br} = \\ = t(0,29 + 0,0011 Db + x) + 0,0018t^2 \text{ ккал/кг сух. вещ.} \quad (12)$$

Следовательно, теплоемкость раствора, отнесенная к 1 кг сухих веществ или сахара, выражается формулой:

$$C = (0,29 + 0,0011 Db + x) + 0,0018t \text{ ккал/кг сух. вещ.} \quad (13)$$

Здесь:

C_p ккал/кг град — теплоемкость раствора,

Db — доброкачественность раствора,

t — температура раствора.

На диаграмме должны быть изображены следующие основные линии: изотермы, изобары, изоконцентраты пересыщения.

Изотермы получим по уравнению (12), задаваясь постоянными температурами в интересующем нас интервале 60 — 100°, при изменении водосодержания от 0 до 0,7 (концентрации от 100% до 60%) и доброкачественности от 100 до 70 единиц.

Для данной доброкачественности $I = f(x)$ — прямая линия с положительным угловым коэффициентом. Если построить изотерму для $Db = 100$ (чистый раствор), то при меньшей доброкачественности изотермы перемещаются параллельно вниз. Масштаб перемещения для различного водосодержания один и тот же — $0,0011(100 - Db)$ ккал/кг град.

Такой характер влияния доброкачественности позволяет использовать диаграмму, составленную для чистых растворов, при расчете

теплосодержания «нечистых», т. е. содержащих несахара, заводских растворов, путем условного перенесения начала координат вдоль оси I .

Система изотерм является исходной для дальнейшего построения диаграммы. Заметим, что, в отличие от упрощенной диаграммы, схема которой описана Аронсом Г. А. [2], в нашем случае каждая изотерма имеет свою точку пересечения с осью абсцисс.

Выпаривание и уваривание производят не при постоянной температуре, а при постоянном разрежении (давлении); температура увариваемой массы изменяется вместе с депрессией. Если в диаграмме для жидких растворов учет депрессии прост и изобару можно считать параллельной изотерме [2, 5], то в нашем случае депрессия велика, а изобара более резко искривлена.

Изобары построим по уравнению (12), в котором температура увеличена на значение депрессии Δ :

$$I = [(0,29 + 0,0011 D\delta + x) + 0,0018 (t + \Delta)] (t + \Delta). \quad (14)$$

Так как при постоянном разрежении депрессия возрастает вместе с увеличением концентрации (уменьшением водосодержания), то изобара будет кривой линией, расположенной выше изотермы.

При $x \rightarrow \infty$ (для бесконечно разбавленного раствора) изобара и изотерма сливаются, что дает основание для каждой изотермы полагать $t = t_s$, где t_s — температура вторичного пара, соответствующая разрежению в аппарате. Кроме того, каждая изобара сопряжена с соответствующей изотермой и на изобарах можно надписать температуры вторичного пара t_s .

Если на изотермах найти точки, соответствующие состоянию насыщения, и соединить эти точки, то получим кривую, которая может быть названа изоконцентратой насыщения. Искомые точки находятся на пересечении изотерм и линий $x = \text{const}$ для тех значений водосодержания, какие отвечают растворимости при температурах, для которых построены изотермы. Изоконцентрата насыщения соответствует коэффициенту пересыщения $\Pi = 1$.

Аналогично построим изоконцентраты пересыщения, отвечающие коэффициентам пересыщения $\Pi > 1$.

В связи с большим количеством вычислений нами построены две вспомогательные номограммы (рис. 1 и 2), которые имеют и самостоятельное значение. По рис. 1 находим водосодержание по концентрации в процентах, по рис. 2 — коэффициенты пересыщения по температуре, растворимости и содержанию сахара в пересыщенном растворе. Номограмма рис. 2 заменяет таблицы растворимости и аналитический расчет пересыщения, весьма неудобный при необходимости интерполировать табличные значения растворимости.

Очевидно, линия $\Pi = 1$ (изоконцентрата насыщения) делит поле диаграммы на две области: правее, для больших водосодержаний, располагается область ненасыщенного раствора, слева от этой линии — область пересыщенных растворов и утфеля. В области пересыщенного раствора имеем смесь кристаллов и маточного раствора. Теплосодержание смеси (утфеля):

$$I = \frac{C_y 100}{Br_y} t \quad \text{ккал/кг сух. вещ.}, \quad (15)$$

где теплоемкость утфеля как средневзвешенная теплоемкости раствора и кристаллического вещества:

$$C_y = C_{\text{сах}} \cdot Kp + C_{\text{раств}} (1 - Kp). \quad (16)$$

Здесь Kp — весовая доля кристаллов.

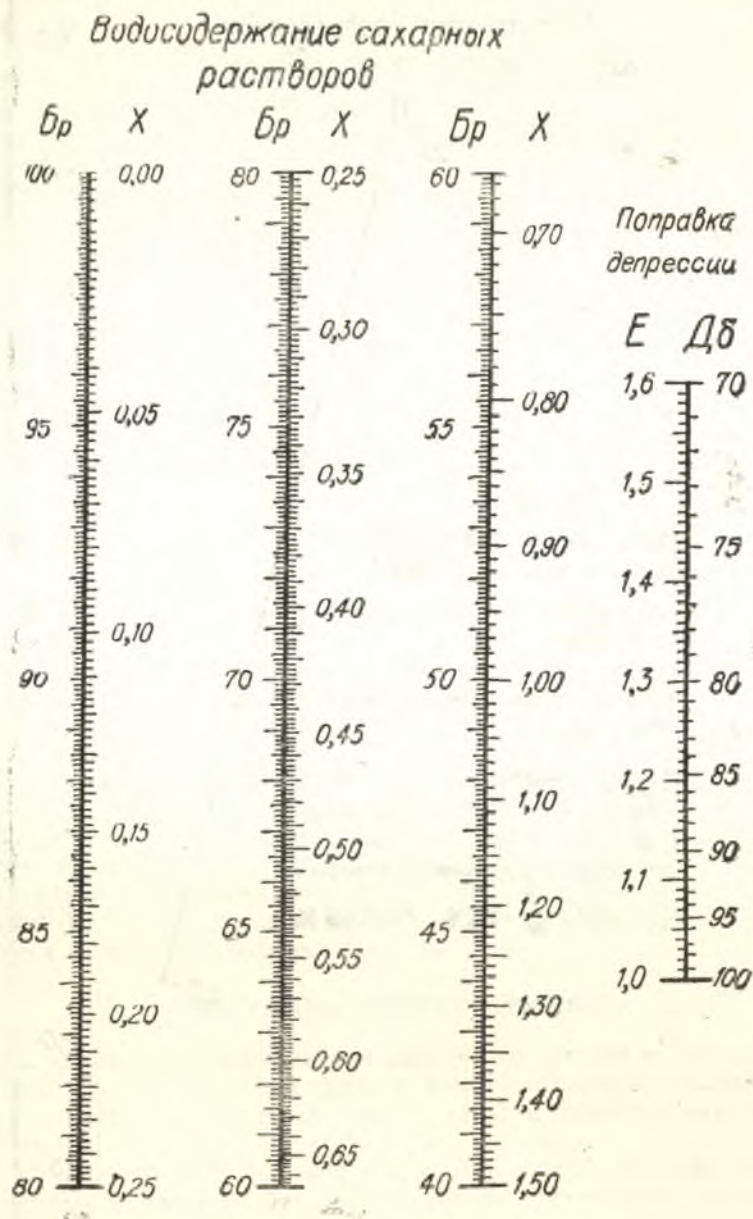


Рис. 1.

Теплоемкость кристаллического сахара, по Яновскому и Архангельскому:

$$C_{\text{сах}} = 0,2775 + 0,00085t \quad \text{ккал/кг сахара}. \quad (17)$$

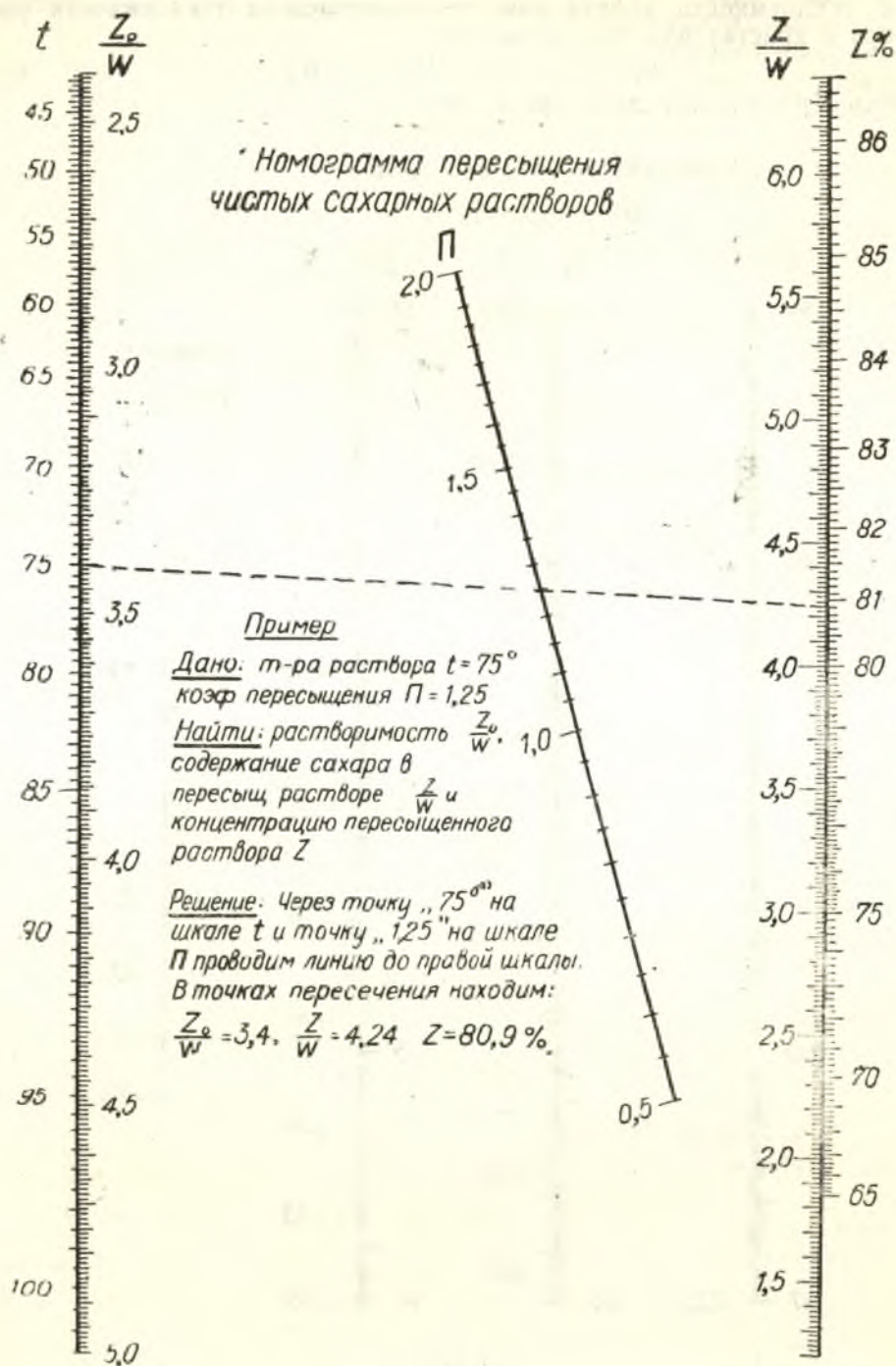


Рис. 2.

На диаграмме кристаллическому сахару соответствуют точки на оси ординат (при $x = 0$); откладывая по этой оси теплосодержания сахара $I_{сах} = C_{сах} \cdot t$, и соединя полученные точки, помеченные температурами, с точками пересечения соответствующих изотерм сиропа и изоконцентраты насыщения, получаем новый пучок прямых — изотермы утфеля. Изотермы утфеля — геометрическое место точек, соответствующих теплосодержанию утфеля.

Изложенные положения приводят к следующей схеме диаграммы (рис. 3). Изотерма сиропа $t = \text{const}$ доходит до линии насыщения $\Pi = 1$; в точке B происходит перелом линии, и далее следует изотерма утфеля BC . Точка C соответствует теплосодержанию кристаллического сахара при температуре t . Если уваривание происходит от начальной концентрации x_n до конечной x_k , то процесс сгущения до насыщения изобразится линией AB , а дальнейшая варка линией BD . Соотношение отрезков DB и CD отвечает относительному содержанию сахара в твердой фазе и растворе:

$$\frac{DB}{CD} = \frac{z_{\text{крист}}}{z_{\text{раств}}} \quad (18)$$

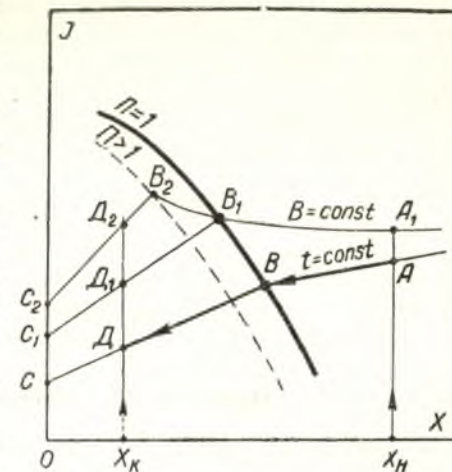


Рис. 3.

Сгущение при постоянном давлении протекает по линии A_1B_1 , уваривание — по линии B_1D_1 . Точка D_1 дает теплосодержание увариваемой массы конечной концентрации x_k .

Так изобразится процесс в предположении, что кристаллы находятся в маточном растворе с коэффициентом пересыщения $\Pi = 1$. В действительности, при варке поддерживается некоторое пересыщение $\Pi > 1$, и процесс сгущения при постоянном разрежении изображается линией A_1B_2 (отрезок изобары), а процесс уваривания — отрезком изотермы B_2D_2 (если депрессия увариваемой массы определяется только свойствами межкристалльного раствора).

Точки C , C_1 и C_2 показывают теплосодержание кристаллов, повышающееся вследствие депрессии.

ДИАГРАММА ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ

Диаграмма, изображенная на рис. 4, построена в соответствии с описанной схемой по приведенным выше исходным уравнениям (9) (12), (14), (17), номограммам рис. 1 и 2 и обобщенным данным о депрессии [1].

Диаграмма состоит из координантной сетки, системы изотерм и сопряженных с ними изобар, пучка линий постоянного пересыщения для Π от 1,0 до 1,35 и вспомогательной номограммы на оси ординат.

Оси диаграммы развернуты под углом 135° , с целью наилучшего использования площади рисунка и построения кривых в наибольшем масштабе; вспомогательная ось x -ов расположена под углом 90° к оси теплосодержания. Таким образом, линии $x = \text{const}$ представляют

собой вертикальные прямые, а линии $I = \text{const}$ — наклонные, под углом 45° к вспомогательной оси.

Пунктирные прямые линии — изотермы; они располагаются расходящимся пучком; сплошные кривые линии — изобары, с пометками соответствующих температур вторичного пара t_s . При уменьшении водосодержания изобара удаляется от сопряженной изотермы вследствие возрастания депрессии; расстояние между изобарами и изотермами увеличивается также с ростом температуры. Изобары и изотермы построены по температурам насыщения вторичного пара с интервалом в 1° , что достаточно для практических расчетов.

Линии постоянного пересыщения с ростом пересыщения сближаются; мы ограничились максимальным значением пересыщения $\Pi = 1,35$, что практически имеет место при современном стахановском способе варки.

Номограмма на оси I позволяет без вычислений находить теплосодержание кристаллов по температуре.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПО ДИАГРАММЕ

Диаграмма теплосодержания дает возможность определять ряд расчетных величин и изображать графически некоторые процессы изменения состояния раствора.

Приведем некоторые примеры.

Определение теплосодержания раствора

Для любой точки A в области ненасыщенного или пересыщенного раствора (рис. 5), через которую проходит изотерма t_1 при заданном

водосодержании раствора x_1 , теплосодержание I_1 находится по наклонной линии, проведенной через точку A параллельно основной оси x .

Например, определим теплосодержание чистого раствора с концентрацией $Br = 66,7$ при температуре раствора 77° .

Решение. По номограмме рис. 1 находим водосодержание по заданной концентрации. При $Br = 66,7$ $x = 0,5$.

На диаграмме рис. 4 находим линию $x = 0,5$ и ищем точку пересечения этой линии с изотермой $t = 77^\circ$; значение

теплосодержания читаем на линии $I = \text{const}$, проходящей через точку пересечения: $I = 80 \text{ ккал/кг}$ сахара.

Определение теплосодержания кристаллов

Теплосодержание твердой фазы $I_{кр}$ читается справа на оси I , против деления шкалы номограммы t , помеченного заданной температурой t_1 . Например, по рис. 4, при $t = 97^\circ$, теплосодержание кристаллов $I_{кр} = 35 \text{ ккал/кг}$ сахара.

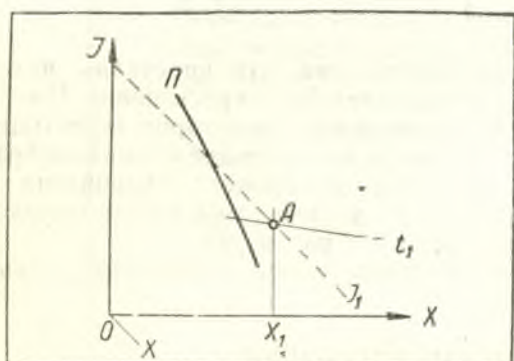


Рис. 5.

Определение теплосодержания рафинадного утфеля

Для рафинадного утфеля полагаем $D_6 = 100$. Пусть заданы: разрежение B , концентрация утфеля Bp_y (или его водосодержание x_y), пересыщение межкристалльного сиропа Π_1 .

По разрежению находим t_s (по таблицам Вукаловича) и на диаграмме рис. 4 помеченную этим значением температуры изобару.

Пересечение изобары с линией $\Pi_1 = \text{const}$ (рис. 6) дает точку A , через которую проходит изотерма t_1 . Значение t_1 отмечается по шкале номограммы на оси I ; получаем точку B , отвечающую теплосодержанию кристаллов $J_{кр}$. Соединяем точки A и B прямой линией; пересечение этой линии с вертикальной прямой $x_y = \text{const}$ дает точку C , для которой и находится I_y .

Этот расчет не учитывает гидростатической депрессии. Если последняя известна, то точка A перемещается по линии Π_1 вверх в точку A' , до изотермы $t_1 + \Delta_r$ (Δ_r — гидростатическая депрессия). Дальнейшие операции производятся так, как было описано; в результате получаем теплосодержание утфеля I_y' , как показано на рис. 6 пунктиром.

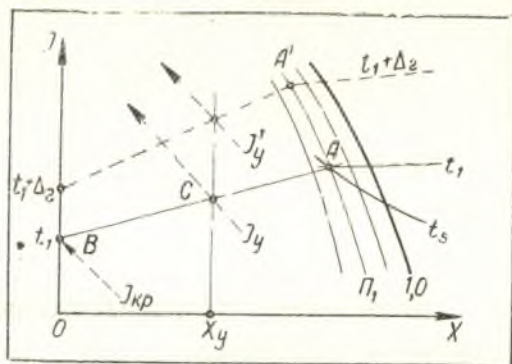


Рис. 6.

Например, пусть $t_s = 64^\circ$, $\Pi = 1,30$, $x_y = 0,15$ ($Bp = 87$).

Решение. Изобара с пометкой $t_s = 64^\circ$ пересекает линию пересыщения $\Pi = 1,30$ в точке, через которую проходит изотерма $t = 72^\circ$. Соединяем эту точку прямой линией с делением номограммы на оси I , помеченным температурой 72° . Пересечение проведенной линии с линией постоянного водосодержания $x_y = 0,15$ дает точку, для которой $I_y = 44$ ккал/кг сахара. Расчет произведен без учета гидростатической депрессии.

Теперь допустим, что $\Delta_r = 8^\circ$. Находим точку пересечения линии $\Pi = 1,30$ с изотермой, помеченной значением $72 + 8 = 80^\circ$; эту точку соединяем прямой линией с делением шкалы номограммы 80° . Пересечение проведенной линии с линией $x_y = 0,15$ дает значение теплосодержания утфеля $I_y' = 50,7$ ккал/кг сахара. Расчет произведен с учетом гидростатической депрессии.

Определение физической депрессии

Пусть известны: температура насыщения вторичного пара t_s , водосодержание раствора x_1 и его доброкачественность. Определим физическую депрессию (депрессию без учета гидростатического эффекта и влияния твердой фазы) для чистого и нечистого раствора.

Решение. На диаграмме рис. 4 отыскиваем изобару, соответствующую t_s , и линию $x_1 = \text{const}$. На пересечении линии $x_1 = \text{const}$ и изобары находится точка A (рис. 7), через которую проходит изотер-

ма t , показывающая температуру раствора. Следовательно, депрессия чистого раствора будет $\Delta_{\text{дч}} = t - t_s$.

Для нечистого раствора результат надо умножить на коэффициент $E > 1$, взятый по номограмме рис. 1 (справа) в зависимости от доброкачественности [1]. В итоге $\Delta_{\text{дч}} = E \Delta_{\text{дч}}$.

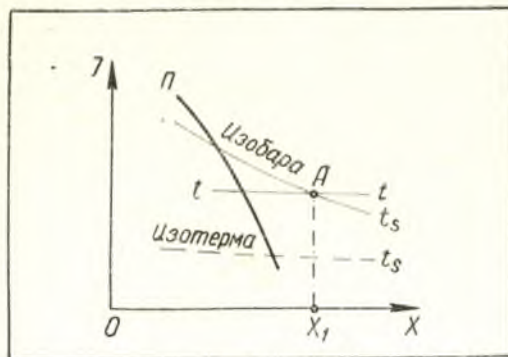


Рис. 7.

Например, пусть заданы: $t_s = 73^\circ$, $x = 0,29$, $Дб = 92$.

По рис. 4 находим точку пересечения изобары $t_s = 73^\circ$ и линии постоянного влагосодержания $x = 0,29$. Через точку пересечения проходит изотерма $t = 80^\circ$; следовательно, депрессия чистого раствора $\Delta_{\text{дч}} = 80 - 73 = 7^\circ$. Далее по рис. 1, при $Дб = 92$, находим $E = 1,1$, откуда депрессия нечистого раствора

$$\Delta_{\text{дч}} = 1,1 \cdot 7 = 7,7^\circ.$$

Определение теплосодержания утфеля I продукта

Покажем, как с помощью нашей диаграммы рассчитывается теплосодержание утфеля при $Дб < 100$ и докажем, что диаграммой можно пользоваться без поправок для приближенного расчета теплосодержания утфеля I продукта сахаропесочного производства.

Теплосодержание раствора, как следует из формулы (14), зависит от доброкачественности и депрессии. При этом понижение доброкачественности вызывает уменьшение теплоемкости и теплосодержания раствора; одновременно понижение доброкачественности приводит к возрастанию депрессии, вследствие чего теплосодержание должно увеличиться за счет повышения температуры. Противоположное действие доброкачественности на депрессию и теплоемкость раствора в значительной мере взаимно уравновешивается, в результате чего теплосодержание растворов сравнительно высокой доброкачественности, например, межкристального сиропа утфеля I продукта, мало отличается от теплосодержания чистого раствора.

Теплоемкость кристаллического сахара, как видно из формулы (17), от доброкачественности не зависит, но зависит от температуры увариваемой массы; следовательно, теплосодержание кристаллов зависит от депрессии, а теплосодержание утфеля, как средневзвешенное теплосодержания кристаллов и раствора, зависит от депрессии и доброкачественности оттока.

С уменьшением водосодержания утфеля увеличивается содержание твердой фазы и уменьшается влияние межкристального сиропа на общее теплосодержание увариваемой массы; поэтому влияние доброкачественности на теплосодержание утфеля уменьшается по мере варки, а теплосодержание нечистого утфеля приближается к теплосодержанию рафинадного утфеля, при прочих равных условиях.

Установим, однако, как выражается разность теплосодержаний чистого и нечистого раствора:

$$\Delta I = I_{\text{чист}} - I_{\text{неч}} \quad (19)$$

Величину ΔI определим в два приема (рис. 8). Вначале отыщем на диаграмме рис. 4 изобару для чистого раствора, соответствующую температуре насыщенного пара t_{s1} . Точка A пересечения изобары с линией заданного пересыщения II_1 характеризует состояние чистого межкристального сиропа.

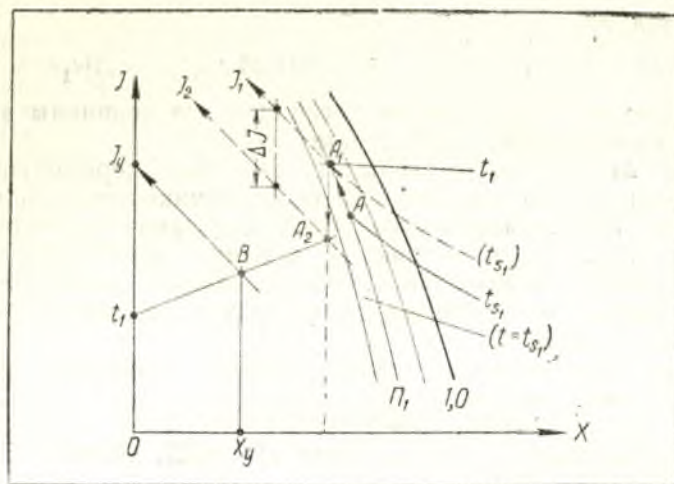


Рис. 8.

Однако, раствор, содержащий несакхара, обладает бо́льшей депрессией; при том же заданном пересыщении II_1 изобара t_{s1} переместится выше, как указано пунктиром, в точку A_1 , через которую проходит изотерма t_1 .

Точка A_1 определяется по положению изотермы t_1 ; значение t_1 будет:

$$t_1 = t + E \Delta_{\text{дч}}, \quad (20)$$

причем t находится по изотерме, сопряженной с изобарой t_{s1} (с пометкой $t = t_{s1}$).

В точке A_1 учтено влияние доброкачественности на повышение точки кипения раствора; однако теплосодержание при температуре t_1 не будет равно I_1 , ибо при понижении доброкачественности уменьшается теплоемкость раствора. Действительное теплосодержание I_2 будет меньше I_1 :

$$I_2 = I_1 - \Delta I \text{ или } I_{\text{неч}} = I_{\text{чист}} - \Delta I, \quad (21)$$

так как диаграмма построена для чистых растворов.

При той же температуре t_1 :

$$I_1 = C_{\text{чист}} t_1; \quad I_2 = C_{\text{неч}} t_1. \quad (22)$$

Отсюда

$$\Delta I = I_1 - I_2 = (C_{\text{чист}} - C_{\text{неч}}) t_1 = \Delta C t_1. \quad (23)$$

Теплоемкость чистого раствора:

$$C_{\text{чист}} = 0,29 + 0,0011 \cdot 100 + x + 0,0018 (t + \Delta_{\text{дч}}). \quad (24)$$

То же, для нечистого раствора:

$$C_{\text{неч}} = 0,29 + 0,0011 Dб + x + 0,0018(t + E\Delta_{\text{дч}}). \quad (25)$$

Разность дает:

$$\Delta C = C_{\text{чист}} - C_{\text{неч}} = 0,0011(100 - Dб) + 0,0018 \Delta_{\text{дч}}(E - 1). \quad (26)$$

Следовательно,

$$\Delta I = [0,0011(100 - Dб) + 0,0018 \Delta_{\text{дч}}(E - 1)]t_1. \quad (27)$$

Вычисление по этой формуле несложно; все величины в ее правой части предварительно определены.

Вычислив ΔI , следовало бы на эту величину переместить вверх начало координат; это равносильно перенесению точки A_1 на ту же величину вниз. Итак, фактическое теплосодержание нечистого маточного раствора I_2 получаем в точке A_2 ; соединяя эту точку с делением шкалы номограммы, помеченным t_1 , на пересечении с линией $x_y = \text{const}$ в точке B имеем теплосодержание утфеля I_y . Здесь x_y — заданное водосодержание утфеля.

Какова же абсолютная величина поправки теплосодержания раствора на доброкачественность?

Пусть $t_s = 65^\circ$, $Dб = 92$, $\Pi = 1,10$.

По номограмме рис. 1 $E = 1,1$ (при $Dб = 92$); значит,

$$\Delta_{\text{дч}} = E\Delta_{\text{дч}} = 6,8 \cdot 1,1 = 7,5^\circ,$$

где по диаграмме рис. 4 $\Delta_{\text{дч}} = 71,8 - 65 = 6,8^\circ$.

Следовательно, изотерма t_1 соответствует температуре

$$t_1 = 65 + 7,5 = 72,5^\circ.$$

Поправка теплосодержания по формуле (27):

$$\Delta I = [0,0011(100 - 92) + 0,0018 \cdot 6,8 \cdot 0,1] 72,5 = 0,725 \text{ ккал/кг сух. вещ.}$$

По диаграмме рис. 4: для чистого раствора $I = 58,1$; с учетом депрессии нечистого раствора $I_1 = 58,6$.

Наконец, по расчету, с учетом влияния доброкачественности на теплоемкость раствора: $I_2 = I_1 - 0,725 = 57,975$ ккал/кг сух. вещ., что почти совпадает с результатом для чистых растворов.

Таким образом, поправка для рафинадных утфелей едва значима, а для утфеля I продукта сахаропесочного производства мало существенна и может быть опущена. Влияние поправки на теплосодержание утфеля еще меньше, как это следует из расположения изотерм утфеля на диаграмме, и, как выше упомянуто, уменьшается с падением водосодержания.

Другие случаи применения диаграммы мы намереваемся показать в отдельной статье на примере уточненного теплового расчета вакуум-аппарата.

ВЫВОДЫ

1. Разработана тепловая диаграмма концентрированных сахарных растворов и утфеля, применимая в ряде случаев для тепловых расчетов аппаратуры.

2. Особенностью диаграммы является учет состояния пересыщенного раствора в смеси с кристаллами, что делает ее пригодной для тепловых расчетов утфельных вакуум-аппаратов.

3. Показано, что в определенных пределах диаграммой можно пользоваться для растворов, содержащих сахара.

4. Приведен ряд числовых примеров, объясняющих способы использования диаграммы в инженерных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В. Д. К вопросу о тепловом расчете вакуум-аппаратов, Труды КТИПП им. Микояна, в. в. 10 и 11.
2. Аронс Г. А. Теплоиспользующие аппараты, 1941.
3. Дунаевский Н. И. I-диаграммы теплообмена, 1939.
4. Schiebl K. Wärmewirtschaft in der Zuckerindustrie, В. II, 1939.
5. Гаусбранд Э., Гирш М. Выпаривание, конденсация и охлаждение (перевод с 7 немецк. издания), 1936.
6. Яновский В. В., Архангельский П. А. ЖСП, № 7—8, 1929.
7. Чернобыльский И. И. Графоаналитический метод расчета выпарных станций сахарных заводов, Н. З., № 4, 1937.
8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии, 1950.
9. Левин И. И., Ткачев А. Г., Розенфельд Л. М. Холодильные машины, 1939.

(Получена редакцией 14 февраля 1952 г.)

Доц. ШЛИПЧЕНКО З. С.,
кандидат технических наук

О СВЕКЛОПОДЪЕМНОМ НАСОСЕ СИСТЕМЫ ЗНАМЕНСКОГО Г. М.

(Кафедра специального оборудования)

В апреле 1950 г. был заключен договор о социалистическом содружестве коллектива научных работников КТИПП им. А. И. Микояна с коллективом работников Пивненковских машиноремонтных мастерских «Укрглавсахара». Одним из обязательств этого договора обеих сторон было изготовление центробежного насоса сист. Знаменского Г. М. для транспортировки и подъема свеклы, его испытание и внедрение в промышленность.

На сахарных заводах промежуточный подъем свеклы на небольшую высоту (5–10 м) осуществляется при помощи наклонных шнеков, подъемных колес, мамут-насосов. В последние годы стали применяться для этой цели центробежные насосы для перекачки свекловодной смеси.

На отдельных сахарных заводах производится подъем свеклы с кагатного поля в гидротранспортер, вследствие более низкого расположения кагатного поля по отношению к моечному отделению завода.

Насос сист. Знаменского Г. М. был спроектирован и осуществлен для транспортировки свеклы во всех перечисленных случаях с подъемом ее на необходимую для завода высоту. В том случае, если бы при испытании оказалось, что свекла при перекачке насосом достаточно отмывается, то такой насос можно было бы применить для подачи свеклы непосредственно на автоматические весы перед резками, установив соответствующий сепаратор для отделения транспортерной воды. В этом случае из обычной схемы работы были бы исключены подъемные устройства до и после мойки и сама мойка. Естественно возникла бы необходимость в улучшении работы камнеловушек и солоمولовушек на гидравлическом транспортере.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ДАННЫЕ СВЕКЛОНАСОСА

Насос (рис. 1) имеет стальное сварное рабочее колесо с двумя лопастями, насаженное консольно на горизонтальном валу. Неуравновешенные массы отсутствуют, благодаря симметричному расположению лопаток специальной формы (рис. 2).

Действие осевых сил частично уменьшено за счет отверстий в центральной части диска (рис. 2). Оставшиеся осевые усилия воспринимаются специальным шарикоподшипником.

При конфигурации лопаток, указанной на рис. 2, рабочее колесо производит подачу только на одной третьей части периметра, что дает возможность выбрать большую ширину колеса без чрезмерного увеличения производительности.

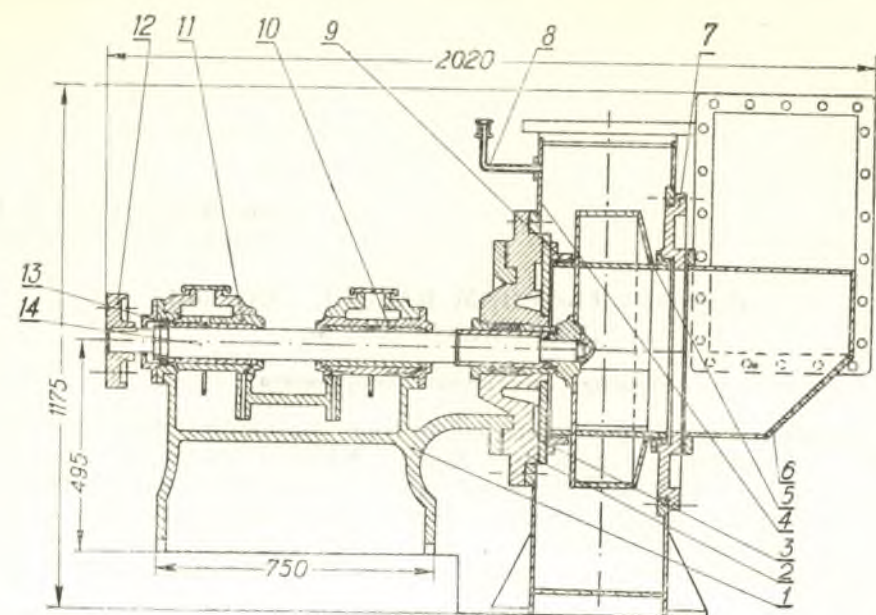


Рис. 1. Центробежный насос для перекачки свеклы с водой.
11 — корпус; 2 — крышка корпуса; 3 — щиток; 4 — улитка насоса; 5 — рабочее колесо; 6 — улитка входная; 7 — фланец улитки; 8 — патрубок для манометра; 9 — уплотняющее кольцо; 10 и 11 — подшипники скольжения; 12 — муфта эластичная; 13 — подшипник качения; 14 — вал.

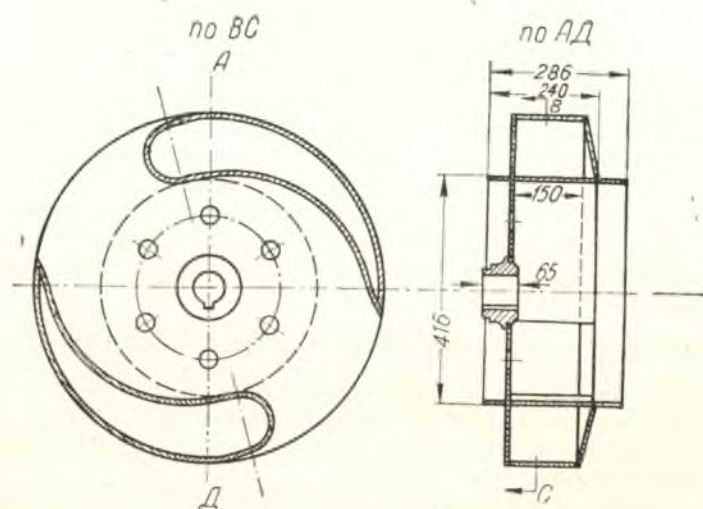


Рис. 2. Рабочее колесо свеклонасоса.

Уплотнение рабочего колеса в корпусе насоса, с целью отделения пространства с всасывающим давлением от пространства с нагнетательным давлением, осуществляется специальными кольцевыми выступами (рис. 2) на рабочем колесе и уплотняющими кольцами 9, закрепленными в корпусе насоса (рис. 1).

Диаметр входной окружности рабочего колеса $D_1 = 400$ мм; диаметр выходной окружности рабочего колеса $D_2 = 680$ мм; ширина рабочего колеса $b_2 = 150$ мм.

При входе в насос установлена специальная улитка (рис. 3). Ее назначение состоит в осуществлении плавного перехода от поступательного движения свекло-водяной смеси в гидротранспортере к вращательному движению колеса. В результате происходит безударный вход перекачиваемой смеси в межлопастное пространство рабочего колеса.

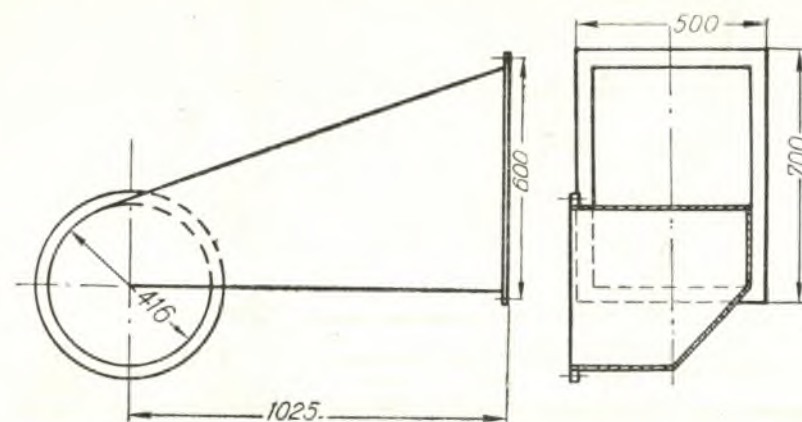


Рис. 3. Входная улитка свеклонасоса.

На выходе из насоса установлен квадратный патрубок со сторонами 310×310 мм.

Габаритные размеры насоса: $2020 \times 1525 \times 1175$ мм, а вес — 1180 кг.

ИСПЫТАНИЯ СВЕКЛОНАСОСА

Первый экземпляр свеклонасоса испытывался в Пивненковских машиноремонтных мастерских на специально построенной установке.

В задачу испытаний входило определение: а) производительности насоса, б) создаваемого напора, в) расхода мощности на насос, г) коэффициента полезного действия насоса, д) устойчивости работы насоса, е) степени повреждения свеклы во время перекачки, ж) общей механической прочности конструкции и износоустойчивости основных деталей насоса.

При создании испытательной установки был принят замкнутый цикл работы насоса. Установка должна была обеспечить проведение основных испытаний на воде и контрольных испытаний с малым количеством свеклы.

Внутренний диаметр нагнетательного трубопровода $D = 353$ мм принят в установке в связи с наличием труб такого размера в машино-ремонтных мастерских. Установка труб с диаметром менее 300 мм не

желательна, так как не соответствовала бы сечению выходного патрубка насоса.

Как показано на рис. 4, вода для работы насоса поступала через мерный сосуд 6, жолоб 3, во всасывающую улитку 2 насоса. Насос подавал воду в вертикальный участок трубопровода 9 общей высотой $H=10\ 160$ мм, а затем в горизонтальный участок 8 длиной 10 860 мм. По наклонной трубе 5 вода поступала в тыльную часть жолоба 3 и снова шла на насос. Длина жолоба 10 150 мм; уклон 22 мм на пог. м.

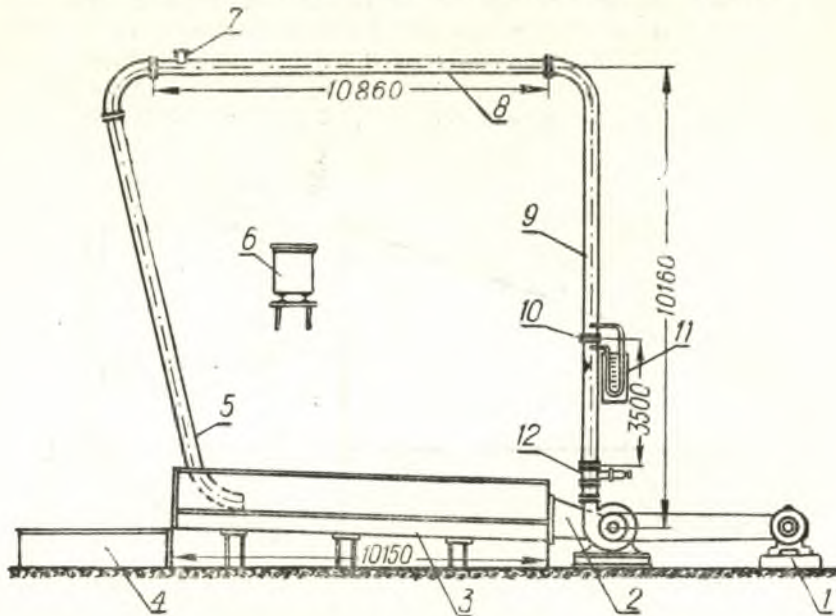


Рис. 4. Схема установки для испытаний свеклонасоса.

(1—электромотор; 2—свеклонасос; 3—жолоб; 4 и 6—мерные сосуды; 5—отводная труба; 7—воздушный патрубок; 8—горизонтальный участок трубы; 9—вертикальный участок трубы; 10—фланцы для установки диафрагмы; 11—дифференциальный манометр; 12—задвижка).

Таким образом поддерживалась непрерывная работа насоса в течение произвольного времени.

Чтобы предотвратить захватывание воздуха насосом при всасывании, жолоб 3 высотой 500 мм и шириной 400 мм с закруглением внизу $R=200$ мм был нарощен вертикальными стенками высотой 900 мм. Следовательно, общая высота жолоба была 1400 мм.

Для предотвращения образования воздушных мешков или вакуума в трубопроводе была предусмотрена открытая вертикальная трубка 7 в верхнем участке трубопровода.

На расстоянии 1650 мм от тыльного торца жолоба 3 был установлен шибер, перегораживающий жолоб. Тыльная торцовая стенка жолоба — съемная. Следовательно, при закрытии шибера и удалении торцовой стенки жолоба, вода, подаваемая насосом, могла поступать в мерный резервуар 4 емкостью 8,35 м³.

Производительность насоса по воде измерялась при помощи диафрагм, устанавливаемых между фланцами 10 специальной конструкции и дифференциального манометра 11.

Напор, создаваемый насосом, измерялся двумя параллельно установленными пружинными манометрами на нагнетательном патрубке насоса 8 (рис. 1).

Потребление мощности насосом определялось по показаниям вольтметра и амперметра.

Испытания на воде

Испытания насоса на воде производились при числе оборотов рабочего колеса $n=480$ обор./мин. При этом были получены характеристики насоса $Q-H$, $Q-N$ и $Q-\eta$, которые представлены на рис. 5.

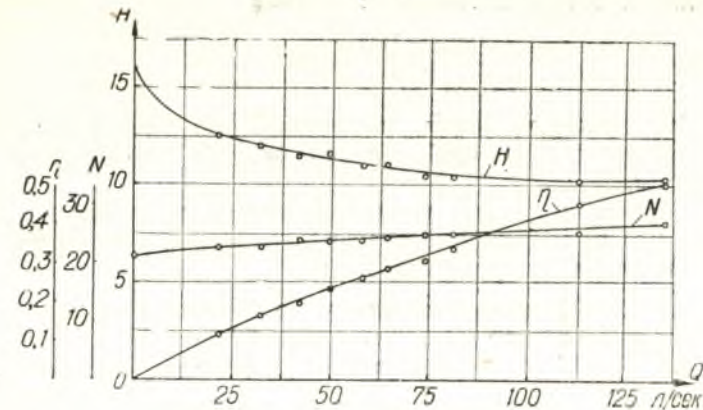


Рис. 5. Характеристика насоса: $Q-H$, $Q-N$, $Q-\eta$ при $n=480$ обор./мин.

Кроме указанных испытаний насоса при $n=480$ обор./мин. были проведены испытания его при повышенном числе оборотов $n=710$ обор./мин. При этом насос создавал напор до 32 м вод. столба.

Испытания на свекло-водяной смеси

При испытании насоса на свекло-водяной смеси были использованы удовлетворительно сохранившиеся свекловичные корни, предназначенные для высадок.

Характеристика корней: диаметр хвостов $d=7\div 10$ мм; средний вес 436 г; наибольший диаметр среднего корня $75\div 90$ мм; длина $225\div 250$ мм; отдельные корни достигали 135 мм в диаметре и 275 мм длины.

В жолоб было взято 3,5 м³ воды, пущен насос и загружено 1,2 т свеклы. Следовательно, процентное содержание воды по весу свеклы составляло:

$$\frac{3,5 \cdot 100}{1,2} = 292 \%$$

Свекло-водяная смесь циркулировала 25 мин. Принимая производительность насоса, на основании $Q-H$ характеристики, при полностью открытой задвижке, равной $Q=135$ л/сек, получим скорость движения свекло-водяной смеси в трубопроводе $v=1,38$ м/сек. Полный оборот

свеклы в системе составлял 29 сек. Следовательно, за время испытаний свекла прошла через насос свыше 50 раз.

Насос работал нормально, забиваний свеклой не наблюдалось. После остановки насоса вода из жолоба была выпущена и свекла выгружена. Внешний вид свеклы был удовлетворительный, однако около 15% корней имели отбитые хвосты. Размятых и раздавленных корней не было обнаружено.

Из этой свеклы было отобрано (400 кг) 916 почти неповрежденных корней. Отобранная свекла была загружена в правую половину жолоба (ближе к насосу). Левее, примерно на половине жолоба, был установлен решетчатый шибер, задерживающий свеклу. Предварительно в жолоб было налито 2,4 м³ воды. Следовательно, процентное содержание воды по отношению к свекле составляло:

$$\frac{2,4 \cdot 100}{0,4} = 600\%.$$

Насос был пущен на время, достаточное для полной перекачки всей свеклы, задерживаемой в левой половине жолоба установленным решетчатым шибером.

После остановки насоса, удаления воды и выгрузки свеклы было установлено, что из 916 корней получили заметные повреждения только 69 корней (поломка хвостов), из них:

22	корня	диаметром	до	15	мм,
35	»	»	»	30	»
12	»	»	»	40	»

Раздавленных и разбитых корней не оказалось.

Затем вся свекла была снова загружена в жолоб и с водой циркулировала в системе 3,5 часа.

Испытание проводилось с целью проверки механических качеств насоса при более или менее продолжительной его работе. После остановки насоса и выгрузки свеклы было установлено, что поверхность свеклы обкатана, имелось значительное количество поврежденной свеклы, но форму свою она сохранила. В течение этого испытания свекла прошла, примерно, 435 раз через рабочее колесо насоса.

Показания приборов при работе насоса на свекло-водяной смеси не отличались от показаний при работе насоса на воде с полностью открытой задвижкой.

В процессе испытаний на свекло-водяной смеси насос неоднократно останавливался при загруженном трубопроводе. Никаких затруднений при последующем пуске насоса не наблюдалось. Механических дефектов не было обнаружено.

При описанных условиях насос при испытании показал следующие результаты работы: $Q = 135 \text{ л/сек} = 485 \text{ м}^3/\text{час}$; $H = 10,25 \text{ м}$; $N = 26 \div 27 \text{ кВт}$; $\eta = 0,485 \div 0,5$.

Испытания в производственных условиях

После испытаний, проведенных в Пивненковских машиноремонтных мастерских, насос был передан для использования в промышленности.

Насос был установлен в Андрушевском сахарном заводе для подачи свеклы из кагатного поля в завод. Особенность кагатного поля Андрушевского сахарного завода состоит в том, что оно находится на 5 м

ниже отметки основного гидравлического транспортера, подающего свеклу из бурачной к заводу. Поэтому, чтобы подать свеклу из гидравлического транспортера кагатного поля в основной гидравлический транспортер, необходимо было осуществить промежуточный подъем свеклы на 5 м.

До установки насоса, в связи с невозможностью гидравлической транспортировки свеклы из кагатного поля в завод, приходилось всю свеклу, хранящуюся в кагатах, перевозить в бурачную гужевым способом или автотранспортом.

Насос был установлен на кагатном поле ниже уровня гидравлического транспортера в специальном здании. Нагнетательный трубопровод, диаметром 350 мм, длиной 15 м, имел одно колено в 120°. Привод к насосу был осуществлен от индивидуального электромотора в 40 кВт через ременную передачу (число оборотов мотора $n = 980 \text{ обор/мин}$, а насоса $n = 475 \text{ обор/мин}$).

В ноябре 1951 г. комиссия Укрглавсахара провела производственные испытания насоса по специально утвержденной программе.

Вначале испытание проводилось при $n = 475 \text{ обор/мин}$. При этом числе оборотов рабочего колеса работа насоса была неравномерной и зависела от количества свекло-водяной смеси, поступающей через всасывающий патрубок на насос. Насос в этом случае развивал слишком большую производительность, в результате чего он периодически выхватывал свекло-водяную смесь из прилегающего к нему участка гидротранспортера, а затем работал вхолостую.

С целью осуществить более равномерную подачу свеклы, соответствующую производительности завода 11—12 тыс. ц/сутки, был заменен приводной шкив у мотора. Число оборотов насоса было уменьшено до 310 в минуту.

После этого работа насоса была равномерной и полностью обеспечивала производительность завода (12 тыс. ц свеклы/сутки). Потребленные мощности насосом составляло $N = 13,5 \text{ кВт}$.

Для оценки степени повреждения свеклы, поданной в завод насосом, было отобрано две пробы:

1. До включения насоса с автоматических весов было отобрано 403 кг свеклы. Из них оказалось: неповрежденной 254 кг, или 63% и поврежденной 149 кг, или 37%.

2. После включения насоса из 405 кг там же отобранной свеклы оказалось: неповрежденной 240 кг, или 59,5% и поврежденной 165 кг, или 40,5%.

Результаты лабораторных анализов транспортерно-моечной воды на содержание в ней сахара до включения насоса и после его включения были одинаковы (0,03%). Следовательно, не было обнаружено заметного увеличения повреждений свеклы при транспортировке ее насосом, по сравнению с подачей свеклы обычным способом.

Свекла по выходе из насоса была достаточно чистая и не требовала дополнительной мойки. Однако, окончательное заключение о необходимости дополнительной мойки не было сделано до проведения более продолжительных наблюдений за работой насоса на свекле разной степени загрязненности.

При этих испытаниях также было установлено, что запуск насоса после нормальной или внезапной остановки не вызывает затруднений и не влечет падения напряжения в сети при полном заполнении насоса свекло-водяной смесью.

При проведении испытаний в Пивненковских машиноремонтных

мастерских на воде и свекло-водяной смеси не было установлено каких-либо посторонних шумов, вибрации насоса, нагрева подшипников, изменения положения креплений узлов и деталей. При вскрытии насоса не обнаружено никаких изменений трущихся поверхностей, уплотнительных приспособлений и пр.

При испытаниях насоса в Андрушевском сахарном заводе также не было обнаружено никаких механических дефектов.

ВЫВОДЫ

1. Насос сист. Знаменского Г. М. прост по конструкции, удобен в обслуживании, дешев в изготовлении и экономичен в работе. На его изготовление требуется относительно меньше металла.

2. Насос занимает всего около 3 м² площади пола.

3. Насос может быть широко внедрен в сахарной промышленности для подъема свеклы.

4. Насос хорошо моет свеклу и с увеличением числа оборотов рабочего колеса может создавать значительный напор. Поэтому насос должен быть испытан с целью применения его для непосредственной подачи свеклы на автоматические весы перед резками.

(Получена редакцией 5 февраля 1952 г.)

Доц. СКОБЛО Д. И.,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

(Кафедра специального оборудования)

Широкое внедрение на предприятиях пищевой промышленности автоматических приборов для контроля, сигнализации и регулирования технологических процессов производства выдвигает вопрос о рациональной организации проектирования таких систем автоматики.

В области проектирования систем автоматического контроля и регулирования имеется уже выработанная в различных проектных организациях (в первую очередь в теплоэнергетических [3]) методика составления необходимых материалов, имеющая свою специфику и практические приемы.

Учитывая, что система автоматического контроля и регулирования является вспомогательным элементом производства, можно ограничиться для этой системы составлением технорабочего проекта.

В проектной документации по системе автоматизации процессов производства должны быть решены следующие вопросы:

1. Определена рациональная структура системы автоматического контроля и регулирования, отвечающая сущности данного производственного процесса, его машинно-аппаратурной оснащенности и принципам организации производства.

2. Выбрана рациональная методика контроля и регулирования данного производственного процесса, отвечающая условиям достижения высоких количественных и качественных показателей производства.

3. Произведен правильный выбор контрольно-измерительных, сигнальных и регулирующих приборов, отвечающий принятой методике контроля и регулирования, учитывающий условия эксплуатации приборов.

4. Решены вопросы целесообразной группировки и компоновки автоматических приборов и устройств на контрольных и оперативных щитах с точки зрения упрощения системы управления производственными процессами.

5. Созданы условия для существенного повышения производительности труда, облегчены и усовершенствованы формы труда обслуживающего персонала.

6. Обеспечено достижение высокой экономической эффективности системы автоматики как результирующего фактора, характеризующего рациональное решение поставленных выше задач.

Учет перечисленных выше руководящих принципов в проектной документации позволит придать системе автоматического контроля и регу-

лирования ту направленность и эффективность, какие присущи автоматике в условиях социалистической организации производства, и добиться органического сочетания системы автоматического управления производством с технологией, техникой и организацией производства [1, 2].

Проектная документация по автоматике в объеме технорабочего проекта должна состоять из следующих разделов:

А) Принципиальной схемы автоматизации контроля и регулирования процессов производства для всего технологического потока.

Б) Технических условий на отдельные узлы и элементы системы автоматического контроля и регулирования.

В) Обоснования выбора методов контроля и регулирования и типов соответствующих приборов.

Г) Рабочих схем автоматического контроля и регулирования отдельных производственных участков.

Д) Спецификации всей контрольно-измерительной, сигнальной, регулирующей, коммутационной и др. вспомогательной аппаратуры.

Е) Проектов контрольных и оперативных щитов с рабочими чертежами к ним и монтажно-коммутационными схемами.

Ж) Рабочих чертежей отдельных узлов и деталей системы автоматизации, относящихся к установке первичных приборов на машинах и аппаратах, конструкции элементов крепления, экранирования и т. д.

З) Планов размещения щитов автоматики в цехах предприятия с трассировкой линий связи, импульсных линий и т. д.

И) Пояснительно-расчетной записки к проекту.

К) Сметно-финансовой документации к проекту.

Л) Расчета экономической эффективности проектируемой системы.

При практическом выполнении того или другого проекта автоматизации проектант может, учитывая объем, сложность и условия осуществления разрабатываемой системы, варьировать необходимые для данного случая проектные материалы, совмещая или упрощая некоторые из них.

Составление принципиальной схемы автоматизации

Отправным материалом при разработке системы автоматического контроля и регулирования технологических процессов для данного производства является принципиальная схема автоматизации.

В принципиальной схеме автоматизации должны быть решены такие вопросы:

а) определена методика и структура автоматизации контроля и регулирования процессов данного производства, исходя из требований технологии и его организации;

б) определены параметры контроля и регулирования по всему технологическому потоку;

в) выбраны на технологической схеме данного производства точки контроля отдельных параметров или точки отбора импульсов на регулирующие системы, отвечающие намеченной методике контроля и регулирования;

г) указаны линии воздействия командных импульсов регуляторов и местоположение их исполнительных или регулирующих органов; при комплексной системе автоматического регулирования — линии влияния одних регулирующих узлов на последующие;

д) даны указания о технике измерения и контроля данных параметров;

е) даны указания о местоположении вторичных приборов и определена необходимость в дистанционной передаче показаний приборов или регулирующих импульсов.

Для построения принципиальной схемы автоматизации можно рекомендовать следующие графические приемы.

Схема подразделяется на две части: вверху чертежа изображается (рис. 1) машинно-аппаратурная технологическая схема данного производственного процесса с основными коммуникациями (продуктовыми, паровыми, водяными, газовыми и т. п.); в нижней части схемы проводятся три группы линий; каждая из групп относится к характеристике определенных факторов процесса измерения или регулирования, например: первая группа линий характеризует параметры контроля или регулирования, вторая группа — технику контроля и регулирования, третья группа — дистанционность измерений и местоположение вторичных элементов приборов.

Машинно-аппаратурная технологическая схема производства изображается либо при помощи принятых условных обозначений машин и аппаратов (как, например, принято в теплоэнергетике), либо путем изображения внешнего вида машин и аппаратов с их характерными элементами.

Далее, пользуясь условными знаками, на технологической схеме данного производственного процесса намечаются точки, в которых необходимо осуществлять контроль или регулирование того или иного параметра рабочего процесса, исходя из сущности процессов, протекающих в соответствующих агрегатах, и намеченных задач автоматического контроля и регулирования.

От знака на технологической схеме, обозначающего место контроля данного параметра или место отбора импульса на регулируемую систему, проводится вертикальная линия до пересечения с системой горизонтальных линий, помещенных в нижней части схемы. На пересечении этой вертикальной линии с той из горизонтальных линий, какая должна характеризовать данный измеряемый фактор по указанным выше трем признакам, ставится кружок или точка.

Таким образом, обнаружив на технологической схеме знак, обозначающий место установки какого-либо прибора, мы по вертикальной линии прочтем, о контроле или регулировании какого параметра идет речь, какова намечаемая техника измерения или регулирования, является ли данный прибор местным или дистанционным и где намечается размещение вторичных приборов контроля или регулирования.

В первой группе линий могут быть перечислены такие параметры рабочих процессов, как температура, давление, уровень, плотность, кислотность, мгновенный расход, количество и т. п.; во второй группе линий — показывающий прибор, регистрирующий, интегрирующий, сигнальный, регулирующий непосредственного действия, регулирующий непрямого действия и т. п.; в третьей группе линий — местные приборы, дистанционные приборы, индивидуальный щит, групповой щит, центральный щит.

Для регулирующих приборов от изображения точки отбора регулирующего импульса проводится линия к местоположению регулирующего органа, показывающая систему воздействия чувствительного органа регулятора на исполнительно-регулирующую часть.

Каждая вертикальная линия, отвечающая какой-либо одной точке контроля или регулирования, нумеруется в порядке их последовательного

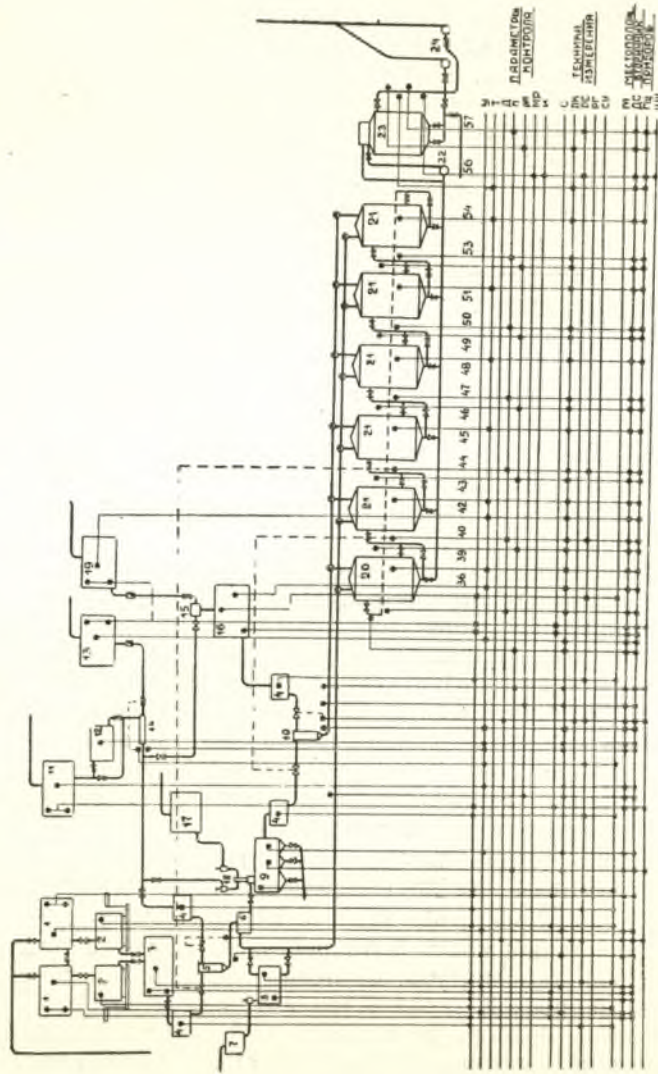


Рис. 1. Пример составления принципиальной схемы автоматизации непрерывного процесса производства спирта из патоки.

(У—уровень; Т—температура; Д—давление; П—плотность; РН—кислотность; МР—мгновительный расход; К—количество; С—сигнальный; ЦК—показывающий; РС—регистрирующий; РГ—регулирующий; СУ—суммирующий; М—место; ДС—дистанционные; ГЩ—групповой щит; ЦЩ—центральный щит).

расположения слева направо. Эта нумерация в дальнейшем повторяется и развивается как в рабочих схемах, так и спецификациях и позволяет связать все последовательные стадии разработки проектных материалов.

Составление технических условий на элементы автоматики

Пользуясь разработанной принципиальной схемой автоматизации, составляются технические условия на отдельные приборы и устройства автоматики.

Технические условия должны составляться для отдельных родственных групп приборов, включая круг вопросов, характерных для данной группы оборудования. Перечень вопросов, освещаемых в тех или иных технических условиях, может варьироваться в зависимости от специфики данной группы приборов [5]. В связи с этим не могут быть преподаны типовые образцы технических условий (универсальные) для всех видов приборов и оборудования. Можно лишь указать примерный перечень вопросов, которые могут быть включены в технические условия с теми или иными коррективами, дополнениями или сокращениями, какие потребуются в каждом отдельном случае.

Так, например, в технических условиях на контрольно-измерительные приборы следует отразить следующие:

1. Контролируемый параметр.
2. Рабочее значение величины параметра.
3. Возможные пределы колебаний величины параметра.
4. Характер изменения величины параметра (плавные, скачкообразные, медленные, быстрые и т. п.).
5. Емкостная характеристика процесса и наличие самовыравнивания, возможные запаздывания в системе объекта контроля или регулирования и в системе измерителя или регулятора.
6. Место установки вторичных приборов и примерная дистанционность.
7. Необходимый тип вторичного прибора.
8. Допустимая приведенная погрешность измерения.
9. Возможные колебания параметров внешней среды (температуры, давления, влажности и т. д.).
10. Пыльность помещения.
11. Наличие вибраций в месте установки первичных и вторичных приборов.
12. Химическая характеристика среды, куда вводится прибор, агрессивность среды.
13. Наличие вредных внешних влияний.
14. Необходимая глубина погружения датчика прибора.
15. Особые условия или требования.

При применении электрических приборов и устройств, требующих питания электротокком, дается характеристика располагаемых источников тока (постоянный, переменный, рабочее напряжение, частота и т. д.).

Для регуляторов дополнительно устанавливается тип регулятора по принципу действия, вид вспомогательной энергии, тип исполнительных и регулирующих органов, необходимость обратной связи и ее характеристика, ряд вопросов динамики регулирования и т. д.

Технические условия обычно принято составлять в виде опросных листов.

Составление рабочих схем автоматизации

Произведенное уточнение методов контроля и регулирования и выбор типов приборов на основе технических условий позволяет перейти к составлению рабочих схем автоматизации для отдельных производственных участков.

С этой целью, пользуясь принципиальной схемой автоматизации всего производства в целом, определяют характер группировки элементов автоматического контроля и регулирования по отдельным щитам, устанавливают общую организационную структуру всей системы автоматизации данного производства. На основе этого уточняется объем и содержание отдельных рабочих схем, их структурные границы в общей системе.

При составлении рабочих схем автоматизации следует пользоваться условными изображениями приборов и других элементов автоматики. Могут быть использованы условные знаки, приведенные в таблице 1 (по данным «Центротеплоконтроля»). В ряде случаев, при необходимости обозначить какие-либо новые приборы или элементы, могут быть по аналогии разработаны подобные изображения, так как в принятых условных изображениях имеется определенная система.

На рабочей схеме автоматизации, пользуясь принципиальной схемой и другими разработанными материалами, уточняются все точки контроля и регулирования, отбора импульсов и т. д.

Разметка точек на рабочей схеме автоматизации ведется приведенными в таблице 1 условными знаками, отражающими тип выбранного первичного прибора и его особенности.

В нижней части схемы производится разметка всех вторичных элементов измерительных, сигнальных или регулирующих приборов и относящихся к ним вспомогательных элементов, производится группировка, если это целесообразно, нескольких первичных приборов на один вторичный и т. п. Условные изображения позволяют конкретно указать тип вторичного прибора, его особенности. Для систематизации и группировки вторичных приборов на щитах или для указания об их установке на местах измерения проводятся жирные горизонтальные линии, где кружочками или точками отмечается принадлежность данного прибора к этой группе (например, местные приборы, индивидуальный щит, групповой щит и т. п.), а ниже линии изображается самый прибор. Вертикальная линия также ведется от изображения первичного прибора к вторичным, показывая их взаимосвязь. Вторичные приборы могут состоять из нескольких элементов, установленных, например, у места измерения и на щите.

Для регулирующих узлов более точно указывается при помощи импульсных линий или линий связи взаимодействие первичных чувствительных элементов с регулятором и последнего с регулируемыми органами, которые уже подробно обозначаются на линиях подачи регулируемых агентов с соответствующими исполнительными механизмами, реле и т. д.

На вертикальных линиях, связывающих изображения первичных и вторичных элементов приборов, могут быть указаны рабочее значение параметра и пределы шкалы прибора, примерная длина импульсной линии или линии связи, выбранный класс точности прибора.

В правой части чертежа, на котором разрабатывается рабочая схема автоматизации данного производственного участка, приводится внешний вид контрольного щита (или щитов), на котором показывается компо-

Таблица 1

Условные изображения автоматических приборов

(1, 2, 3 — размеры условных изображений на схемах в мм; 4 — труба Вентури; 5 — нормальная диафрагма; 6 — то же, с конденсационными сосудами; 7 — то же, с разделительными сосудами; 8 — дифманометр поплавковый, механический, показывающий; 9 — то же, бесшкальный, с индукционным передатчиком; 10 — дифманометр поплавковый, самопишущий; 11 — то же, с дополнительной записью давления; 12 — то же, с дополнительной записью температуры; 13 — то же, с суммирующим счетчиком; 14 — дифманометр-колебательный, показывающий; 15 — то же, с омическим передатчиком, бесшкальный; 16 — вторичный индукционный прибор, показывающий; 17 — то же, самопишущий; 18 — то же, с пневматическим регулированием; 19 — то же, работающий от индукционного передатчика; 20 — дифманометр колокольный с индукционным передатчиком; 21 — пневмометрическая трубка; 22 — дифманометр двухтрубный, стеклянный; 23 — расходомер щелевой; 24 — ротаметр с индукционным передатчиком; 25 — расходомер постоянного перепада давления с индукционным передатчиком; 26 — счетчик жидкости, скоростной; 27 — счетчик жидкости, дисковый; 28 — точка отбора давления; 29 — однотрубный стеклянный манометр; 30 — то же, двухтрубный; 31 — тягомер мембранный, показывающий, профильный; 32 — то же, дифференциальный; 33 — тягомер колокольный, показывающий; 34 — мя-

нометр, вакуумметр, тягомер пружинный, показывающий; 35 — то же, самопишущий, контактный; 36 — крзипереключателъ; 37 — регулятор давления «до себя» непосредственного действия; 38 — то же, «после себя»; 39 — поплавковая камера выносная; 40 — механический указатель уровня (рейка); 41 — датчик указателя положения задвижки; 42 — указатель положения задвижки; 43 — замер или сигнализация уровня; а) верхнего, б) нижнего; 44 — сигнализация верхнего и нижнего уровней; 45 — измеритель или сигнализатор уровня сыпучих материалов; 46 — манометрический термометр, показывающий; 47 — то же, самопишущий; 48 — терморегулятор манометрический непосредственного действия; 49 — термометры сопротивления: а) одинрный, б) двойной; 50 — логометр профильный, показывающий; 51 — то же, самопишущий; 52 — панель уравновешенного моста; 53 — то же, неуравновешенного; 54 — автоматический уравновешивающий мост, самопишущий; 55 — то же, с позиционным регулированием; 56 — термопара; 57 — милливольтметр профильный, показывающий; 58 — то же, самопишущий; 59 — то же, контактный самопишущий; 60 — потенциометр, показывающий; 61 — то же, самопишущий; 62 — то же, с позиционным регулированием; 63 — то же, с пропорциональным регулированием; 64 — то же, с пневматическим регулированием; 65 — оптический пирометр (телескоп); 66 — радиационный пирометр (телескоп); 67 — фотоэлемент; 68 — терморегулятор фотоэлектрический; 69 — термометр ртутный, контактный; 70 — источник регулируемого напряжения; 71 — переключатель; 72 — вольтметр, амперметр, показывающие; 73 — то же, ваттметр; 74 — сигнальные лампы: а) белая, б) красная, в) зеленая, г) желтая, д) синяя; 75 — а) сирена, б) звонок; 76 — самосни; а) датчик, б) приемник; 77 — точка отбора среды для анализа; 78 — датчик электр. газоанализатора постоянного тока; 79 — то же, переменного тока; 80 — датчик электрического психрометра; 81 — датчик кондуктометра; 82 — датчик иономер (измерителя pH); 83 — датчик ареометрического плотнoмера; 84 — датчик плотнoмера погружного взвешивания; 85 — датчик пьезометрического плотнoмера; 86 — датчик пикнометрического плотнoмера; 87 — клапан с электромагнитным приводом; 88 — клапан рычажный; 89 — клапан поплавковый; 90 — а) дроссельный клапан, б) градуированный клапан; 91 — поршневой исполнительный механизм; 92 — моторный исполнительный механизм позиционного регулирования; 93 — то же, пропорционального регулирования; 94 — счетчик импульсов; 95 — струйное гидравлическое реле; 96 — ключи управления: а) контактор, б) контактор с сигнальной лампой, в) кнопки управления; 97 — датчик тахометра; 98 — тахометр самопишущий.

новка всех тех приборов и элементов, какие выносятся на данный щит. При этом важно не только разместить все необходимые приборы на щите и определить тем самым его габаритные размеры, но, главным образом, дать рациональное решение компоновки приборов на щите, исходя из удобства для обслуживающего персонала сопоставления сопряженных показаний приборов, облегчения наблюдений и быстрого нахождения нужного показателя и т. д.

Сигнальные лампы обычно группируются по их функциональным признакам и размещаются на щите компактно в определенной зоне панели щита. Те же сигнальные лампы, какие связаны с соответствующими измерительными приборами и сигнализируют о достижении определенных значений контролируемого параметра, обычно должны располагаться рядом с соответствующим прибором.

Пример выполнения рабочей схемы автоматизации в том виде, как это описано выше, приведен на рис. 2, из которого можно полностью усмотреть принципы ее построения.

На рабочих схемах автоматизации повторяется та же нумерация приборов, какая была принята на принципиальной схеме. Но так как на рабочей схеме каждой точке контроля или регулирования соответствует несколько элементов (первичный датчик, вторичные приборы), то все эти элементы нумеруются под тем же номером, но с соответствующими индексами, например, 15а, 15б, 15в.

При обосновании выбора тех или иных приборов, особенно автоматических регуляторов, при определении их технических характеристик производятся необходимые расчеты согласно принципам и методике, какая излагается в соответствующих курсах по автоматике.

В некоторых случаях, когда общепринципиальные вопросы методики контроля и регулирования уже решены и имеется полная ясность в выборе определенных приборов, их размещении и взаимосвязи, можно совместить составление принципиальной и рабочей схемы в единую схему автоматизации. Пример такого сочетания дан на рис. 1 нашей статьи [6].

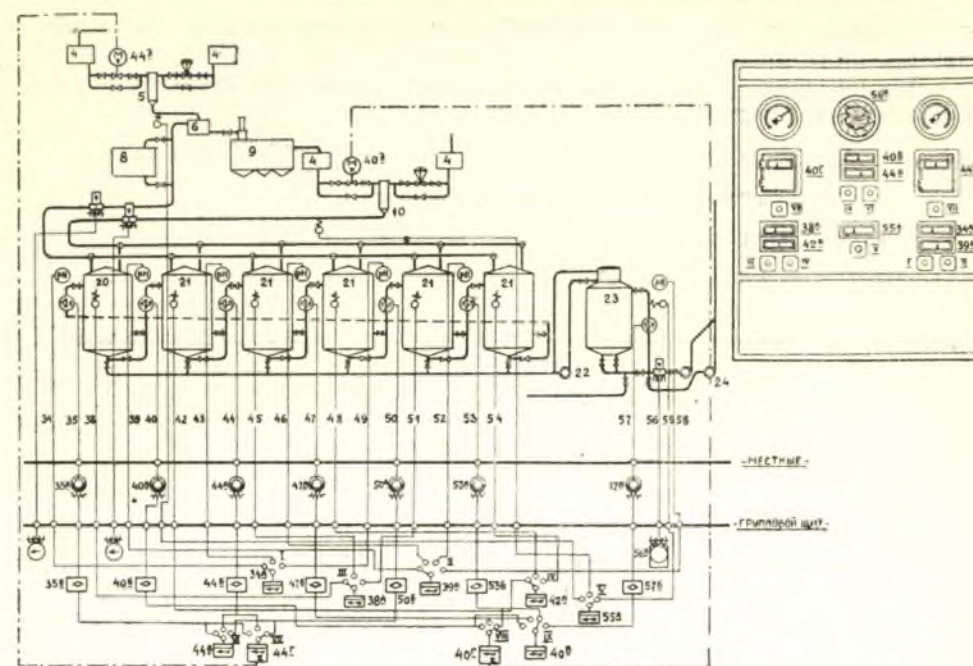


Рис. 2. Пример составления рабочей схемы автоматизации бродильного отделения пачного спиртового завода (исходя из схемы, приведенной на рис. 1).

Составление спецификаций на приборы

Рабочие схемы автоматизации и относящиеся к ним материалы позволяют составить подробные спецификации контрольно-измерительных, сигнальных и регулирующих приборов и относящихся к ним элементов.

В спецификациях приводятся подробные технические характеристики приборов, их тип, заводские марки и требуемое количество материалов.

Основная развернутая спецификация приборов составляется обычно по последовательности расположения приборов в технологическом потоке с нумерацией, принятой в принципиальной схеме и развитой в соответствующих рабочих схемах.

На основании спецификации к рабочим схемам составляется сводная спецификация на приборы и материалы.

Для составления сводной спецификации делается выборка одноименных и однотипных приборов из спецификаций по рабочим схемам, и они одной позицией показываются в сводной спецификации с указанием общего количества приборов данного типа, необходимых для всей проектируемой системы.

При выборе приборов и составлении развернутой спецификации необходимо стремиться к их большей унификации по типам и техническим характеристикам, пользуясь соответствующими ГОСТами. Это позволит уменьшить число типов-размеров приборов, укрупнив количество в каждом типе. В процессе приобретения, монтажа и эксплуатации автоматического оборудования это даст свой положительный эффект. Конечно такую унификацию следует делать не в ущерб технике измерения или

регулирования, не в ущерб тем требованиям, каким должны удовлетворять приборы согласно техническим условиям.

Пример сводной спецификации в отношении ее структуры и формы приведен в таблице 3.

Таблица 2

Спецификация автоматических приборов по рабочей схеме

автоматизации _____ цеха (агрегата)

Составлена на основании каталогов _____

издания 19 ____ года.

№ пп	№ чертежей	Технологический агрегат	Контролируемая среда	Параметр контроля или регулирования	Наименование прибора	Дистанционность	Единица измерения	Пределы измерения			Тип прибора	Заводская марка и класс точности	Техническая характеристика и № ГОСТ	Количество приборов	Примечание
								рабочее значение параметра	пределы изменения параметра	пределы шкалы прибора и цена деления					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Таблица 3

Сводная спецификация автоматических приборов

Составлена по каталогам _____

и ценникам _____

издания 19 ____ года.

№ пп	Наименование	Тип	Марка и № ГОСТ	Техническая характеристика	Количество	Цена единицы	Стоимость	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9

При составлении спецификаций следует пользоваться действующими ГОСТами, каталогами и ценниками.

Прочие проектные материалы системы автоматического контроля и регулирования

Проект системы автоматического контроля и регулирования должен также содержать чертежи контрольных и оперативных щитов с монтажно-коммутационными схемами, рабочие чертежи отдельных узлов и

деталей, планы размещения щитов и трассировочные планы линий связи и импульсных линий и т. д.

В соответствии с количеством приборов, устанавливаемых на данном щите, их типом и размерами, производится выбор габаритных размеров щита, числа его панелей, типа и конструкции.

Для щитов имеется ГОСТ 3244—46, согласно которому следует подбирать тип щита и его размеры. В последнее время появились также гнутые бескаркасные щиты, имеющие хороший внешний вид, обтекаемую форму и достаточно простые в изготовлении.

Расположение различного оборудования на щитах производится следующим образом. На передних панелях щитов располагаются контрольно-измерительные приборы, авторегуляторы, сигнальные лампы, переключатели, кнопки командной сигнализации.

Внутри щитов на тыльной стороне передних панелей монтируется вся коммутация щита, импульсные подводы, клеммные сборки, панели с подгоночными катушками. Вся коммутация производится одножильным проводом марок ПР-380 или ПР-500 сечением 1,5 - или 2,5 мм², иногда специальным монтажным проводом с кембриковой или пластмассовой изоляцией. Провода родственных напряжений укладываются компактными пакетами однослойно, реже многослойно.

Соединения проводов или необходимые ответвления производятся только на клеммных панелях, которые собираются в зажимные сборки группами.

На задней и иногда боковой стенках щита устанавливаются приборы электропитания: трансформаторы, выпрямители, стабилизаторы, рубильники, выключатели, группы предохранителей, реле технологической сигнализации, звонки и сирены, пневматические или гидравлические реле и т. п.

На пультах управления щитов располагают аппаратуру воздействия на двигатели электропривода, аппаратуру воздействия на авторегуляторы, переключатели блокировки, ключи телеуправления и т. д.

Щитовые контрольно-измерительные приборы выпускаются разных типов: круглые разных размеров, прямоугольные профильные.

Размещение контрольных и оперативных щитов, а также специальных щитов (релейных, щитов самописцев, авторегуляторов и т. п.) на планах цехов или отделений предприятия должно подчиняться принятой структуре автоматического контроля и регулирования процессов производства и разработанной системе управления производством.

Следует иметь в виду, что внедрение на предприятии новых форм организации производства на основе технологической автоматизации дает основание для пересмотра принятых в данной отрасли производства принципов организации управления агрегатами в сторону их рационализации, уменьшения количества потребного обслуживающего персонала, группировки органов управления ряда агрегатов с целью централизации управления и т. п.

Ошибочным и принципиально неверным будет стремление сохранить при новых технических средствах контроля и управления старые формы организации управления производством.

Вопросам организационного порядка в проектах автоматизации должно быть уделено серьезное внимание, ибо без рационального решения этих вопросов трудно достичь максимально эффективных результатов, какие присущи автоматике в условиях социалистической организации производства [4].

Электрические линии связи от первичных приборов к щитам следует вести при помощи специальных кабелей, причем в одном кабеле необходимо объединять родственные линии одинакового напряжения и назначения. В кабелях желательно предусматривать всегда наличие запасных свободных жил для возможности в процессе эксплуатации подключения каких-либо дополнительных элементов или быстрой ликвидации возникающих неисправностей.

Подвод питания к щитам осуществляется силовыми кабелями соответствующих марок. При этом следует иметь в виду необходимость заземления, либо наличие нулевой фазы.

Импульсные линии для передачи давления в гидравлических или пневматических системах к аппаратуре, расположенной на щитах, проводятся стальными, при небольших диаметрах — медными трубами. При этом импульсные линии следует прокладывать группами низкого и высокого давления.

Трассировка на планах и разрезах предприятия кабелей и импульсных линий должна производиться с учетом необходимости предельного сокращения их протяженности, защиты от возможных механических повреждений, вредных внешних влияний, а также исходя из их доступности для монтажа, проверки и ремонта.

Выводы

1. Приведенные в данной статье соображения по методике проектирования систем автоматического контроля и регулирования технологических процессов в пищевых и родственных отраслях производства определяют задачи, какие подлежат решению при проектировании таких систем, определяют объем и характер проектных материалов, дают основания для правильного решения возникающих при проектировании автоматических систем вопросов.

2. Рекомендуется методика составления и графического оформления принципиальных и рабочих схем автоматизации, являющихся основными элементами проектных материалов по автоматизации процессов производства.

3. Рекомендуются формы технических условий и спецификаций автоматических приборов.

4. Приводятся образцы условных изображений приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленков В. И. и Храмой А. В. Автоматика и телемеханика в народном хозяйстве СССР, 1948.
2. Храмов А. В. Технико-экономические основы автоматизации, 1949.
3. Козьмин А. П. и Чистяков С. Ф. Автоматизация теплосиловых установок, 1940.
4. Скобло Д. И. Некоторые вопросы организации и проектирования системы автоматизации технологических процессов пищевых производств, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
5. Скобло Д. И. О методах классификации автоматических производственных приборов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
6. Скобло Д. И. Принципиальная схема автоматизации уфельного вакуум-аппарата непрерывного действия, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.

(Получена редакцией 31 января 1952 г.)

Доц. СКОБЛО Д. И.,
кандидат технических наук

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ УТФЕЛЬНОГО ВАКУУМ-АППАРАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

(Кафедра специального оборудования)

В данной статье приводятся предварительные соображения по автоматизации уфельного вакуум-аппарата непрерывного действия системы проф. Знаменского и инж. Бурякова.

Вакуум-аппарат непрерывного действия данной системы представляет собой секционный аппарат со ступенчато расположенными нагревательными элементами [5].

В соответствии с принципом работы вакуум-аппарата непрерывного действия, а также исходя из общих технологических принципов кристаллизации сахара, можно задачи автоматического управления работой такого вакуум-аппарата сформулировать следующим образом:

1. Обеспечение определенной производительности аппарата.
2. Стабилизация при заданной производительности технологического режима работы аппарата, обеспечивающего оптимальные качественные показатели.

3. Обеспечение технологического и теплового контроля процессов в аппарате, как средства настройки и контроля системы автоматического регулирования аппарата, а также для наблюдения за работой аппарата.

Решение этих задач обеспечивается системой автоматических регуляторов, воздействующих на основные количественные и качественные параметры рабочего процесса аппарата, и системой автоматического контроля и сигнализации [9]. На систему автоматического контроля и сигнализации возлагается функция контроля за состоянием и качеством работы органов автоматического регулирования, наблюдение за рядом дополнительных показателей рабочего процесса, не связанных с системой авторегулирования, но важных с точки зрения условий работы аппарата, и, наконец, для своевременной сигнализации обслуживающему персоналу о тех или иных нарушениях в работе аппарата или в работе узлов автоматического регулирования, которые требуют вмешательства обслуживающего персонала.

Задачи автоматизации вакуум-аппарата непрерывного действия вызывают необходимость предъявления производству ряда требований, которые должны обеспечить соответствующие условия работы автоматизированного аппарата.

Эти требования могут быть сведены к следующим положениям.

1. Стабилизация качества продуктов, питающих аппарат (сиропа и паток).
2. Стабилизация параметров греющего пара и вакуума в зонах аппарата с целью обеспечения оптимальных условий теплообмена во всех греющих элементах.

Учитывая зависимость работы вакуум-аппарата от работы других станций завода, следует в конечном итоге решать задачу комплексной автоматизации всего производства в целом, когда при помощи стройной системы регулирующих автоматических звеньев будет достигнуто гармоническое развитие процессов производства по всему технологическому потоку. В этом случае и вакуум-аппарат будет получать соответствующие полупродукты и тепловые агенты. При этом будет гарантирована стабилизация режимов работы на всех станциях и обеспечение оптимальных условий работы каждого аппарата в отдельности.

Данные для установления режимов технологического процесса в аппарате могут быть приняты на основе материалов испытания опытной модели вакуум-аппарата [5], а также на основе предложенного Головиным П. В. и Поповым В. Д. [4] приближенного расчета утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия. На основании этих данных можно выбрать ориентировочные величины параметров рабочего процесса аппарата в различных зонах аппарата и секциях.

Для разработки в дальнейшем рабочей схемы автоматизации того или иного конкретного производственного аппарата необходимо будет произвести поверочный расчет аппарата на основе предложенной методики и установить параметры рабочего процесса и динамику их изменения при различных режимах работы.

На основе анализа рабочего процесса аппарата можно наметить разработку системы автоматического управления вакуум-аппаратом в двух направлениях:

А) Автоматизации технологического и теплового контроля аппарата.

Б) Автоматизации регулирования технологических и тепловых процессов в аппарате.

Можно наметить следующие параметры контроля:

1. Технологические параметры: а) плотность поступающих в аппарат продуктов: сиропа, белой и зеленой патоки;

б) плотность уходящей утфельной массы;

в) степень пересыщения раствора в конце первой зоны аппарата — зоне закладки кристалла.

Для контроля этих параметров имеются проверенные и надежно работающие автоматические приборы, и эти параметры, таким образом, будут известны в течение всего периода работы аппарата, что позволит соответствующим образом наладить систему регулирования.

Было бы важным автоматически контролировать еще и другие технологические параметры, а именно: плотность межкристалльной патоки в различных зонах аппарата, коэффициент ее пересыщения в тех же зонах и т. п.

Однако до сего времени еще нет достаточно надежных приборов, основанных на физико-химических методах контроля этих факторов в условиях, какие при этом имеют место, вследствие чего для этой цели необходимо вести дальнейшие исследования.

Пользуясь контролем указанных выше технологических параметров, недостаток других объективных критериев технологического процесса в аппарате восполняется контролем теплового режима в разных зонах аппарата и настройкой органов управления аппарата на режим, определяемый опытными данными, обеспечивающими при прочих равных условиях стабилизацию технологического процесса на оптимальном для данного периода работы уровне.

2. Тепловые параметры: а) температура продуктов, поступающих в аппарат;

б) температура продукта в различных зонах аппарата (целесообразно после каждой греющей секции);

в) давление греющего пара различных потенциалов, поступающего в греющие секции;

г) вакуум в различных секциях аппарата.

3. Количественные измерения: а) расход продуктов, поступающих в аппарат, в первую очередь измерение количества сиропа, поступающего в первую секцию аппарата, и суммарного количества прочих продуктов, поступающих в виде подкачек;

б) расход греющего пара.

Количественные измерения (мгновенные расходы) продуктов необходимы для настройки аппарата на определенную заданную производительность согласно расчету аппарата и для наблюдения за постоянством расхода продуктов с целью стабилизации режима работы аппарата.

Автоматическое регулирование подачи продуктов можно заменить при постоянстве напоров на линиях подачи системой стабилизации подачи, изложенной ниже. При этом можно также установить сигнальные приспособления в расходомерах с тем, чтобы при отклонениях расхода продуктов от установленных норм обслуживающий персонал был об этом своевременно оповещен. То же относится и к сигнализации плотности поступающего сиропа и др. продуктов с тем, чтобы не было допущено снижение плотности ниже оптимальной величины.

Измерение расхода греющего пара целесообразно, исходя из необходимости контроля экономических показателей работы аппарата и составления его тепловых балансов, а также проверки работы поверхностей нагрева.

Автоматическое регулирование аппарата может быть сведено к регулированию следующих факторов:

А) Обеспечение необходимой степени пересыщения сиропа в зоне закладки кристалла.

Б) Обеспечение определенного режима подкачек, исходя из оптимального режима уваривания в различных зонах аппарата.

В) Обеспечение постоянного вакуума в зонах аппарата и постоянного давления греющего пара.

Г) Обеспечение определенного теплового режима в аппарате, дающего конечный продукт постоянного качества.

При стабилизации ряда факторов, о которых сказано выше, сведение системы автоматического регулирования к этим четырем узлам может обеспечить полную автоматизацию процесса работы аппарата и достижение необходимых количественных и качественных показателей.

Выбор методов контроля и регулирования и соответствующих автоматических приборов

Плотность поступающих продуктов (сиропа, патоки — белой и зеленой) целесообразно измерять при помощи пьезометрических дифференциальных плотномеров, которые для продуктов такого рода являются наиболее подходящими.

Из известных в измерительной технике автоматических плотномеров (ареометрических, погружного взвешивания, пикнометрических, манометрических или пьезометрических) пьезометрические приборы имеют ряд существенных преимуществ.

Это подтверждено опытом применения пьезометрических плотномеров в различных практических случаях, а также проводимыми в КТИПП им. А. И. Микояна экспериментальными работами по пьезометрическим плотномерам [9].

На основе имеющихся теоретических и экспериментальных материалов по пьезометрическим плотномерам необходимо спроектировать прибор для данных конкретных целей.

Такой же плотномер может быть установлен в уфельной барометрической трубе для контроля плотности уходящего уфеля, причем в этой точке целесообразно установить самопишущий прибор, который непрерывно регистрировал бы качество уходящего из аппарата готового продукта.

Степень пересыщения сиропа в зоне заводки кристалла может контролироваться на основе кондуктометрического метода контроля уваривания уфелей, предложенного Силиным П. М. [1]. Кондуктометрический метод контроля уваривания уфелей основан на том, что показания кондуктометра (измерителя электропроводности раствора), как показали исследования, связаны не с изменением плотности сиропа, а с изменением коэффициента пересыщения увариваемого сиропа. При этом функциональная зависимость электропроводности раствора [6] от коэффициента пересыщения в условиях уваривания уфелей практически почти не зависит от колебания температуры и доброкачественности сиропа. Эти обстоятельства позволяют выбрать данный метод в качестве основного метода контроля процесса сгущения сиропа до состояния, наиболее благоприятного для заводки кристалла.

Пользуясь контролем процесса уваривания в зоне аппарата, соответствующей процессу заводки кристалла, по кондуктометру, можно на основании показаний такого прибора обеспечить не только контроль уваривания, но и управлять процессом работы аппарата в этой зоне.

В качестве кондуктометра может быть принят кондуктометр ЦНИЛКИПа [1], либо легко может быть сконструирован прибор для данных конкретных условий работы и особенностей его установки в аппарате.

Измерение температур в различных точках аппарата по ходу продукта, а также температуры поступающих в аппарат продуктов целесообразно организовать при помощи малонерционных электрических термометров сопротивления, которые из числа автоматических измерителей температуры в данных температурных диапазонах являются наиболее простыми, точными и удобными.

Применение электрических термометров сопротивления (а может быть, впоследствии и вновь применяемых термисторов) позволит при помощи единой измерительной системы охватить централизованно все точки контроля температуры продукта, не ограничивая их числа.

Давление греющего пара и вакуум в зонах аппарата можно контролировать при помощи обычных, применяющихся в настоящее время ртутных приборов, либо при помощи соответствующих пружинных или мембранных приборов с дистанционной передачей показаний. Это определяется тем, что в этих точках должно быть организовано автоматическое регулирование давления греющего пара и вакуума, контрольные же приборы будут служить лишь для целей периодической проверки работы авторегуляторов.

Важным вопросом является контроль расхода поступающих в аппарат продуктов. Как указывалось, для стабилизации работы аппарата

необходимо обеспечить определенное по интенсивности и равномерности поступление начального сиропа, а также количества подкачиваемых в аппарат дополнительных питающих продуктов.

Учитывая значительную плотность и вязкость поступающих в аппарат продуктов, вопрос о выборе рациональных приборов для измерения мгновенного расхода продуктов является достаточно сложным. Для этой цели необходимо будет провести ряд экспериментов, чтобы выбрать наиболее рациональный метод измерения.

Можно рекомендовать проверку таких методов измерения: ротаметра с индукционной передачей показаний, щелевого гидростатического расходомера с дистанционной передачей. Другие методы измерения и, в частности, дроссельные расходомеры вряд ли могут быть применены.

Для лучшей и более стабильной работы расходомеров желательна подача продуктов под постоянным напором, для чего необходимо в производственных условиях это обеспечить путем установки поплавковых сигнализаторов или регуляторов уровня в продуктовых резервуарах.

Расход греющего пара может быть измерен обычными методами при помощи дроссельных расходомеров путем установки нормальных диафрагм и соответствующих дифманометров дистанционного типа.

Все приборы автоматического контроля должны быть размещены на контрольном щите данного аппарата.

Ниже приводятся соображения по методике автоматического регулирования намеченных выше регулирующих узлов.

Обеспечение необходимой степени пересыщения сиропа в зоне заводки кристалла

Учитывая условия работы данного вакуум-аппарата, можно наметить следующую методику автоматизации этого участка.

Следует указанным выше методом, пользуясь установленными контрольными и сигнальными приборами, обеспечить стабилизацию качества поступающего начального сиропа и отрегулировать подачу сиропа на постоянную величину соответственно заданной производительности аппарата. Далее необходимо стабилизировать параметры греющего пара и вакуум в первой зоне, а также следить за состоянием поверхностей нагрева с точки зрения обеспечения высокого коэффициента теплопередачи.

При соблюдении этих условий процесс автоматического регулирования уваривания сиропа в первой зоне аппарата до получения необходимого коэффициента пересыщения, обеспечивающего оптимальные условия для заводки кристалла, будет сводиться к управлению подачей греющего пара от кондуктометрического датчика, установленного в зоне заводки кристалла при переходе сиропа из первой зоны аппарата во вторую. Датчик кондуктометра при помощи электроизмерительной схемы может воздействовать на регулирующий паровой вентиль с электрическим приводным механизмом.

Данный узел регулирования требует разработки рациональной электроизмерительной схемы и экспериментальной проверки в заводских условиях с целью установления необходимого режима работы кондуктометрического датчика и регулятора, воздействующего на подачу пара в первую секцию аппарата.

Такой метод регулирования путем воздействия на подачу греющего пара, а не на приток начального сиропа, целесообразен потому, что стабилизация постоянного поступления сиропа в аппарат, при этом сиропа постоянной плотности, обеспечивает постоянство нагрузки аппарата и его

производительность, а уже достижение необходимого состояния сиропа в зоне закладки кристалла должно быть достигнуто за счет тепловых факторов.

Автоматизация подкачек

Важным вопросом при решении методики автоматического управления работой вакуум-аппарата непрерывного действия является автоматизация производимых по ходу движения продукта подкачек сиропа, белой и зеленой патоки. Эти подкачки должны обеспечить по всему пути продукта, начиная от зоны закладки кристалла, определенную степень пересечения маточного раствора, при котором процесс кристаллизации идет наиболее эффективно.

Кондуктометрический метод при этих условиях себя не оправдывает, так как наличие твердой кристаллической массы изменяет электропроводность продукта и не дает прямой оценки раствора. В связи с этим необходимо прибегнуть к косвенным методам управления подкачками, которые бы практически обеспечили соответствующие условия протекания процесса кристаллизации.

Такой косвенный метод управления подкачками может быть основан на предварительном расчете данного аппарата и установлении закона подкачек.

Расчет утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия по методу Головина и Попова [4] дает возможность, при обеспечении постоянства подачи начального сиропа и стабилизации плотности сиропа и патак, установить на основе расчетной кривой подкачек строгий режим подкачек по зонам аппарата. Заранее выбранная закономерность подкачек по зонам аппарата при условии стабилизации прочих факторов позволяет обеспечить по всему пути движения утфельной массы в аппарате оптимальные условия для процесса кристаллизации.

С целью автоматического управления подкачками на основе расчетной кривой подкачек настраивается в соответствии с принятой закономерностью группа специально отрегулированных вентилях, которые блокируются друг с другом и автоматически управляются от главного сиропного вентиля, подающего в аппарат начальный сироп. Такая блокировка позволяет, с одной стороны, обеспечить определенную закономерность подкачек (отрегулировка вентилях по кривой подкачек), с другой стороны, обеспечивает необходимое соотношение между количеством начального сиропа и суммарным количеством подкачек (блокировка с главным сиропным вентиляем). Предложенный метод подачи подкачек в аппарате непрерывного действия практически должен дать положительный эффект.

Для эпизодического контроля состояния маточного раствора в различных зонах кристаллизации должен, как обычно, производиться лабораторный анализ проб утфеля из разных зон. Такие эпизодические анализы позволят проверить эффективность принятого метода управления подкачками и настраивать систему заблокированных вентилях.

В аппаратах же периодического действия, как справедливо указывается Поповым [3], для этой же цели автоматизации подкачек может быть применен программный регулятор, управляющий вентиляем для подкачек, настроенный также по расчетной кривой подкачек. В аппаратах же непрерывного действия такой программный регулятор заменяется системой отрегулированных и заблокированных вентилях, распределенных по зонам аппарата.

Автономное регулирование параметров греющего пара и вакуума

Для поддержания постоянного давления греющего пара и вакуума на подводящих паровых магистралях и линиях вакуума по зонам должны быть установлены регуляторы давления, настроенные на определенное значение давления пара и вакуума. Для регулирования давления во всех этих точках могут быть применены регуляторы давления непосредственного действия, которые достаточно просты конструктивно и надежны в работе.

Поддержание постоянного давления греющего пара может быть организовано путем смешения основного греющего пара данного потенциала с некоторым количеством пара более высокого потенциала (например, сокового пара с отработанным паром) таким образом, чтобы всегда иметь греющий пар определенного начального давления и температуры.

Что же касается автоматического регулирования величины вакуума по зонам и количественной подачи пара в отдельные греющие элементы, то здесь следует принять на основании детального поверочного расчета аппарата, основанного на экспериментальных материалах, уже достаточно накопленных в работах Знаменского Г. М. и Попова В. Д., определенную закономерность распределения вакуума по зонам и расхода пара в них, при которых обеспечивается необходимый характер тепловых процессов. При стабилизации прочих факторов это, очевидно, не представит особых трудностей и даст вполне удовлетворительные условия осуществления тепловых процессов по зонам.

Можно при этих условиях паровые вентили, подающие пар в отдельные зоны, отрегулировать и заблокировать подобно вентилям для подкачек. Кроме того, имеется возможность и автоматического управления подачей пара в греющие элементы. Один из методов автоматического управления подачей греющего пара по плотности конечного продукта-утфеля, уходящего из аппарата, изложен при описании принципиальной схемы автоматизации.

Принципиальная схема автоматизации вакуум-аппарата непрерывного действия

Схема составлена на основе принятой методики графического изображения схем автоматизации при помощи условных обозначений приборов [8].

Схема автоматизации вакуум-аппарата приведена на рисунке.

В верхней части схемы показана развернутая конструктивная схема аппарата со всеми относящимися к нему коммуникациями и вспомогательными устройствами.

В соответствующих точках показано размещение необходимых первичных чувствительных элементов контролируемых или регулирующих приборов. Тип этих первичных чувствительных элементов-датчиков выбран в соответствии с условиями контроля данного параметра, пределами изменения величины данного параметра, требуемой чувствительности и точности измерения, а также исходя из условий работы прибора.

При помощи вертикальных линий на схеме показано, с какими вторичными приборами связаны первичные чувствительные элементы, какого типа вторичные приборы установлены и местоположение последних (на месте измерения или регулирования, на групповом щите). Для регулирующих узлов показаны линии воздействия регуляторов на регулирующие органы, осуществляющие непосредственное воздействие на процесс.

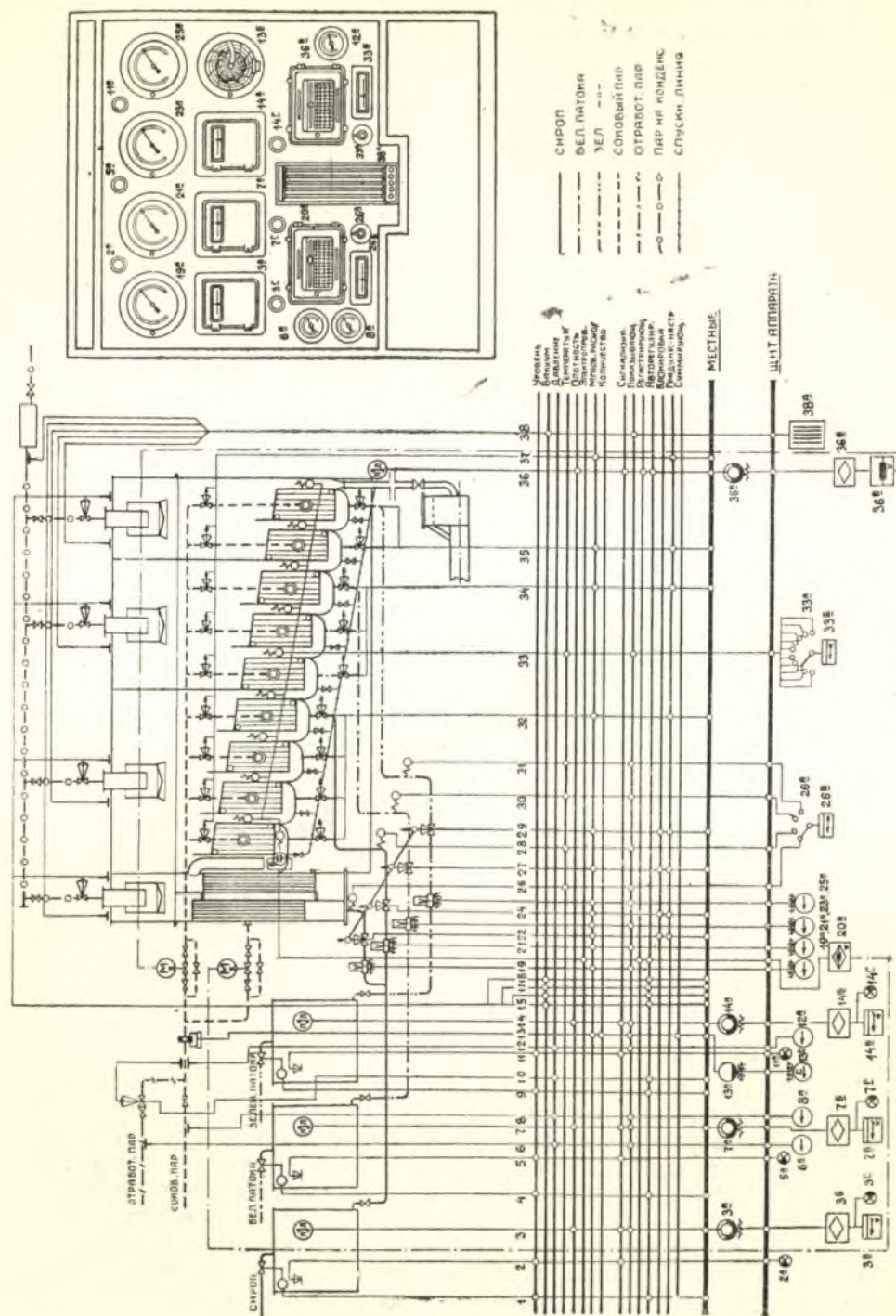


Схема автоматизации уфельного вакуум-аппарата непрерывного действия Знаменского Г. и Бурякова Н.

Наконец, в правой части схемы приведена ориентировочная компоновка приборов на контрольно-оперативном щите.

Кратко поясним основные принципиальные вопросы автоматического контроля и регулирования, отраженные в предложенной принципиальной схеме автоматизации аппарата.

В резервуарах-сборниках сиропа и патоки, откуда аппарат питается начальными продуктами, рекомендуется установка автоматических поплавковых регуляторов уровня, обеспечивающих постоянство напора продуктов при поступлении в аппарат (1, 4, и 9). С целью контроля работы этих регуляторов уровня непосредственного действия намечена сигнализация уровня при падении его ниже допустимой величины (2, 5 и 11).

В этих же сборниках установлены пьезометрические измерители плотности продуктов 3, 7 и 14. Установка датчиков плотномеров в сборниках определяется тем, что при данных условиях компоновки коммуникаций невозможно конструктивно осуществить установку приборов на трубопроводах, подающих продукты в аппарат. В качестве вторичных приборов плотномеров приняты контактные гальванометры с сигнализацией величины минимально допустимой плотности данного продукта. Контактные гальванометры включены в диагональ неравновесного моста, одним из плеч которого является омический датчик кольцевого дифманометра плотномера.

На линиях подачи продуктов в аппарат (сиропных, белой и зеленой патоки) устанавливаются расходомеры шелевого типа (либо другие, что будет уточнено на основании экспериментальных исследований) с индукционными передатчиками, показания которых воспроизводятся вторичными приборами на щитах 19, 21, 23 и 25. По этим расходомерам можно следить за равномерностью подачи продуктов в аппарат, что должно обеспечиваться группой заблокированных градуированных кранов 22, 24, 27 и 29, установленных на линии питания аппарата начальным сиропом и продуктами подкачек. При этом мыслится, что, с одной стороны, этими градуированными кранами будет определяться необходимая производительность аппарата и, с другой стороны, устанавливаться правильное соотношение количества начального сиропа и продуктов подкачек в соответствии с расчетными данными для данного аппарата, проведенными практикой работы. Для установления этого соответствия все четыре градуированных крана (либо вентиля специальной конструкции) заблокированы таким образом, что при установке главного сиропного крана, подающего начальный сироп в первую зону аппарата на необходимую производительность аппарата, одновременно устанавливаются на необходимую пропускную способность и все остальные три крана для подкачек.

Что же касается правильного распределения подкачек по отдельным секциям каждой зоны соответственно расчетной кривой подкачек, то это достигается ручной настройкой градуированных кранов или вентиля каждой секции в начале пуска аппарата в ход (32, 34 и 35). Кроме того индивидуальная настройка кранов подкачки каждой секции позволяет всегда произвести необходимую корректировку, исходя из условий работы аппарата. Таким образом, отградуировка кранов каждой секции и общая отрегулировка и блокировка главных четырех кранов подачи продуктов в аппарат обеспечивает необходимый режим работы аппарата в части питания его продуктами.

Одновременно контролируется электрическими термометрами сопротивления температура продуктов, поступающих в аппарат (26, 28, 30 и 31).

Схемой предусматривается обогрев всех греющих элементов аппарата паром одного потенциала. При этом намечается использование в основном сокового пара. Но, с целью обеспечения постоянства давления этого пара, намечается добавление некоторого количества отработанного пара при помощи автоматического регулятора давления непосредственного действия 10; тем самым обогрев ведется соковым паром несколько повышенного потенциала, но зато постоянного значения. На подводных паровых линиях измеряется давление сокового и отработанного пара и их смеси при помощи обычных манометров 6, 8 и 12, а также суммарный расход пара на аппарат 13 при помощи нормальной диафрагмы с дифманометром, с индукционным передатчиком и самопишущим вторичным прибором с суммирующим счетчиком.

Для регулирования работы первой секции аппарата с целью достижения после этой секции необходимой степени пересыщения сиропа, при которой осуществляется заводка кристалла, в камеру, куда поступает сироп из первой секции, установлен датчик кондуктомера. Датчик кондуктомера воздействует на автоматический уравновешенный мост с электрическим позиционным (либо пропорциональным) регулированием. Автоматический мост управляет регулирующим вентиляем с электромоторным исполнительным механизмом, при помощи которого регулируется подача пара в первую зону аппарата.

Управление подачей греющего пара во все остальные греющие элементы аппарата намечено следующим образом. Общая подача пара во вторую, третью и четвертую зоны аппарата суммарно автоматически регулируется по плотности конечного утфеля, уходящего из аппарата. При повышении или понижении плотности утфеля по сравнению с установленной оптимальной для аппарата соответственно прикрывается или открывается паровой вентиль, чем достигается необходимая степень дросселирования пара и приведение в соответствие потенциала греющего пара с режимом испарения в зонах аппарата.

Для осуществления такого регулирования на барометрической утфельной трубе установлен датчик пьезометрического плотномера, который в конечном итоге через автоматический потенциометр с позиционным (либо пропорциональным) регулированием воздействует на паровой регулирующий вентиль на линии подачи пара во вторую, третью и четвертую зоны аппарата (36).

Для правильного же распределения пара между отдельными греющими элементами последние снабжены градуированными вентилями 37, которые настраиваются в соответствии с заданным режимом подкачек по расчетной кривой подкачек. Окончательная настройка этих вентиляей производится при начальной наладке работы аппарата.

На линиях вакуума каждой зоны аппарата устанавливаются автоматические регуляторы давления непосредственного действия 15, 16, 17 и 18. При помощи этих регуляторов в каждой зоне аппарата поддерживается необходимая величина вакуума.

Кроме того, вакуум контролируется во всех зонах и общий на вакуумной магистрали конденсатора при помощи обычных трубных ртутных вакууметров, соединенных в единый измерительный агрегат 38, установленный на контрольном щите аппарата.

После каждого греющего элемента измеряется температура продукта при помощи термометров сопротивления, которые через переключатель присоединены к показывающему логометру 33.

Вторичные приборы всех контролирующих и регулирующих узлов установлены на контрольном щите аппарата. Компоновка размещения этих приборов на щите приведена на общем виде щита, помещенном на рисунке. Пользуясь нумерацией приборов на щите и схеме легко проследить назначение и тип каждого из приборов.

Направление дальнейших исследований

В данной работе в порядке первого сообщения возможно было рассмотреть и наметить предварительные пути автоматизации утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия, предложить методику автоматического регулирования основных узлов автоматической системы, высказать соображения о выборе тех или иных приборов и устройств.

Однако для осуществления и освоения такой системы в практических условиях эксплуатации промышленного аппарата необходимо поставить ряд исследований и экспериментальных работ.

Представляется целесообразным наметить такие этапы последующих работ по данной теме:

1. Для установленного на заводе промышленного аппарата провести поверочный технологический и тепловой расчет на основе уточненных экспериментальных и заводских данных, который мог бы быть положен в основу расчета и подбора автоматических приборов и узлов.

2. Провести испытание действующего заводского аппарата при различных режимах работы и исследование динамики его рабочего процесса с целью накопления практических данных по наладке и управлению работой аппарата.

3. Произвести окончательный выбор методов контроля и регулирования и соответствующих приборов и составить на этой основе рабочую схему автоматизации аппарата.

4. Осуществить расчет и конструирование ряда необходимых новых автоматических приборов и регулирующих узлов по объектам, указанным выше, по которым не могут быть непосредственно применены типовые аппараты и приборы.

5. Разработать систему комплексной автоматизации сахарного производства, в первую очередь на участках, смежных с работой вакуум-аппаратов, с тем, чтобы обеспечить полную увязку в работе сопряженных агрегатов производства и тем самым облегчить и упростить автоматизацию вакуум-аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силин П. М. Кондуктометрический контроль уваривания утфелей, 1950.
2. Знаменский Г. М. Новая тепловая схема сахарного завода, Труды КТИПП им. Микояна, в. 10.
3. Попов В. Д. К вопросу о тепловом расчете вакуум-аппаратов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 10 и 11.
4. Головин П. В. и Попов В. Д. Приближенный расчет утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
5. Знаменский Г. М. и Буряков Н. И. Непрерывно действующих вакуум-аппарат, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.

6. Павлов И. С. и Романкевич В. Н. Электропроводность сахара, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.

7. Скобло Д. И. Некоторые вопросы организации и проектирования систем автоматизации технологических процессов пищевых производств, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.

8. Скобло Д. И. Методика проектирования систем автоматического контроля и регулирования технологических процессов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.

9. Глыбин И. П. и Скобло Д. И. Разработка пьезометрических автоматических плотметров для продуктов спиртового и сахарного производства, Труды КТИПП им. Микояна, в. 12.

(Получена редакцией 31 января 1952 г.)

И. о. старш. научн. сотрудника ГЛЫБИН И. П.,
доц. СКОБЛО Д. И.,
кандидат технических наук

РАЗРАБОТКА ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПЛОТНОМЕРОВ ДЛЯ ПРОДУКТОВ СПИРТОВОГО И САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВ

(Кафедры энергетики и специального оборудования)

При решении вопросов автоматизации контроля и регулирования производственных процессов в спиртовом и сахарном производствах возникает необходимость в создании автоматических плотномеров, которые удовлетворяли бы предъявляемым к ним требованиям в отношении чувствительности, точности измерения, эксплуатационных особенностей и возможности применения для продуктов, обладающих специфическими физико-химическими свойствами.

Анализ различных методов автоматического измерения плотности жидких продуктов производства, проведенный рядом авторов [1—15], а также нами, показал, что для продуктов и полупродуктов спиртового и сахарного производств наиболее подходящим методом контроля плотности является пьезометрический метод.

Пьезометрический (или манометрический) метод измерения плотности основан на измерении давления столба жидкости данной плотности. При этом применяется дифференциальный метод измерения плотности по разности давлений двух столбов жидкости разной высоты.

На рис. 1 изображена принципиальная схема пьезометрического метода измерения плотности. На вертикальном участке трубопровода 1, где движется испытуемый продукт, устанавливаются на определенном расстоянии друг от друга два приемника давления 2. К этим приемникам присоединен чувствительный дифференциальный манометр 3, измеряющий перепад давлений на этом участке трубопровода.

Если обозначить через:

D — весовую плотность испытуемого продукта, в $кг/м^3$,

P — перепад давления, измеряемый дифманометром, в $кг/м^2$, или в $мм$ водяного столба,

$D_{ж}$ — весовую плотность рабочей жидкости, находящейся в дифманометре, в $кг/м^3$.

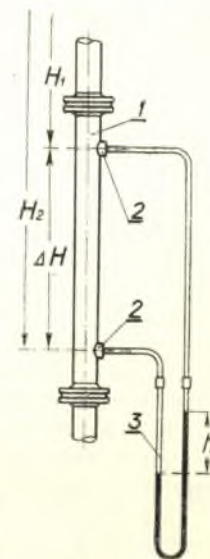


Рис. 1. Схема пьезометрического метода измерения плотности.

D' — весовую плотность вещества, находящегося над рабочей жидкостью в дифманометре, в $кг/м^3$,

ΔH — расстояние между горизонтальными плоскостями приемников давления плотнометра 2—2, в $м$,

h — разность уровней рабочей жидкости в дифманометре, в $м$,

то

$$H_2 D - H_1 D = h(D_{ж} - D'),$$

или

$$\Delta H D = h(D_{ж} - D') = P. \quad (1)$$

Таким образом, перепад давления, измеряемый дифманометром, пропорционален плотности испытуемой среды, если принять расстояние между приемниками давления ΔH величиной постоянной.

Необходимое расстояние между приемниками давления (датчиками плотнометра) для выбранного дифманометра с известным верхним пределом измерения будет определяться как

$$\Delta H = \frac{h_{\max}(D_{ж} - D')}{D_{\max}}, \quad (2)$$

а перепад давления, вызываемый изменением плотности испытуемого продукта от минимального до максимального значения ее, получим из уравнения:

$$\Delta H(D_{\max} - D_{\min}) = (h_{\max} - h_{\min})(D_{ж} - D') = \Delta P,$$

или

$$\Delta P = \Delta h(D_{ж} - D') = \Delta H(D_{\max} - D_{\min}). \quad (3)$$

Измерение плотности продуктов производства по перепаду давления, возникающего между двумя точками, расположенными на разной высоте в испытуемом продукте, позволяет создать удобные и сравнительно несложные приборы, пригодные для контроля плотности даже неоднородных структурных жидкостей, какими являются в большинстве случаев продукты спиртового и сахарного производства. Кроме того, при компенсации балластного перепада давления, соответствующего минимальной плотности данного продукта, и измерении только полезного перепада, соответствующего изменению плотности от минимума до максимума, а также при компенсации температурных влияний можно получить при помощи таких плотномеров достаточно высокую точность измерения.

Как будет показано ниже, в плотномерах данного типа легко осуществляется дистанционная передача показаний, а также воздействие плотнометра в качестве командного органа на регуляторы того или иного типа.

На основе изучения различных типов пьезометрических плотномеров, известных из литературы как отечественных, так и иностранных авторов, а также в развитие работ, проведенных в КТИПП им. А. И. Микояна ранее [6 и 7], были поставлены исследования, в результате которых разработан ряд модификаций автоматических плотномеров пьезометрического метода измерения для производственного их применения. В этих системах плотномеров учтен опыт конструирования и эксплуатации подобных приборов в различных отраслях промышленности и предложены решения, обеспечивающие достижение относительно высокой точности измерения, необходимой чувствительности, возможность использования ряда типовых элементов приборов и сочетание плотномеров с типовыми вторичными приборами показывающего, регистрирующего или регулирующего типа.

Пьезометрические плотнометры могут выполняться в двух основных вариантах:

1. Путем измерения давления сжатого воздуха, пропускаемого через испытуемый продукт; при этом давление сжатого воздуха в системе является функцией давления столба жидкости, преодолеваемого воздухом (пневмометрические приборы).

2. Путем прямого измерения тем или другим способом давления испытуемой среды в соответствующих точках.

Пьезометрические плотнометры первого типа — с пропуском (барботажем) воздуха через испытуемый продукт — могут быть конструктивно достаточно просты и надежны, однако не всегда допустимы по условиям производства.

Плотнометры второго типа — с непосредственным измерением давления испытуемого продукта — требуют подбора достаточно чувствительных приемников давления, которые в то же время были бы надежны, сравнительно просты конструктивно и удобны в эксплуатации.

Для достижения высокой чувствительности и точности измерения плотности дифференциальным пьезометрическим плотномером имеет также большое значение компенсация возникающего балластного перепада давления, соответствующего величине минимальной плотности, принятой для данного диапазона измерений. Также существенна автоматическая температурная компенсация при колебаниях температуры продукта.

Ниже дано описание разработанных типов пьезометрических плотномеров, где решены вопросы компенсации постоянной составляющей балластного перепада давления, температурной компенсации, автоматическое регулирование давления сжатого воздуха, поступающего в систему плотнометра при изменении давления в испытуемой среде. Кроме того, разработаны плотнометры первого типа с пропуском через продукт сжатого воздуха, а также второго типа с прямым измерением давления при помощи различных приемников.

На рис. 2 показана схема пьезометрического дифференциального плотнометра пневмометрического типа (с пропуском сжатого воздуха). Особенности данной схемы являются следующие моменты:

1. Наличие автоматического гидравлического регулятора давления сжатого воздуха.

2. Применение в качестве дифманометра электрического емкостного прибора.

3. Компенсация балластного перепада давления.

4. Автоматическая температурная компенсация.

Измерительным датчиком прибора являются трубки 1—2, погруженные в испытуемый продукт на разную глубину, через которые барботируется сжатый воздух.

Компенсация постоянного балластного перепада давления, соответствующего величине минимальной плотности в измеряемом интервале, достигается установкой компенсационного сосуда 7. Принцип действия такого компенсатора состоит в том, что короткая трубка датчика плотнометра 1 последовательно соединена с трубкой компенсационного сосуда, конец которой погружается в эталонную жидкость на глубину, определяемую из условия, что давление столба эталонной жидкости должно равняться перепаду давления испытуемого продукта при минимальной плотности D_{\min} и принятой разности глубин погружения датчика.

Полезный перепад давления при этом, возникающий от изменения плотности по сравнению с D_{\min} , воспринимается емкостным дифманометром.

метром конструкции Ленинградского теплотехнического института. Манометр состоит из камеры 8, между фланцами которой зажата тонкая мембрана 9, воспринимающая действующий перепад давления и служащая одной из обкладок конденсатора. Вторая обкладка 10 жестко закреплена на стержне 11. Деформация мембраны вызывает изменение емкости конденсатора.

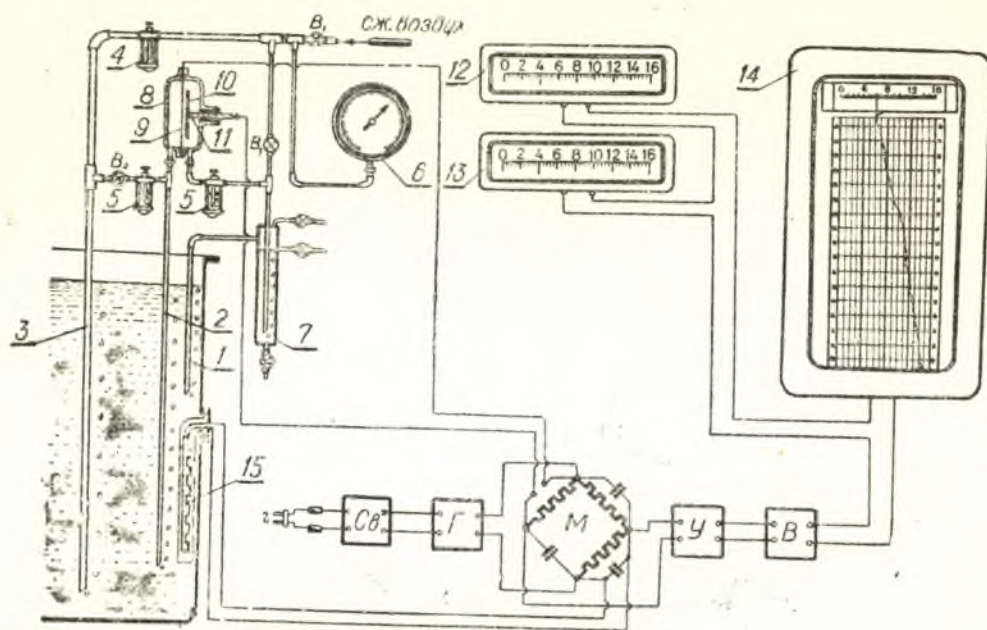


Рис. 2. Дифференциальный пьезометрический плотномер пневмометрического типа с емкостным дифманометром и компенсацией балластного перепада давления и температурных влияний.

Емкостный манометр включен в одно из плеч неравновесного моста M . В диагональ моста подведено питание от генератора Γ звуковой частоты. Ток в измерительной диагонали усиливается электронным усилителем $У$ и подводится к выпрямителю $В$ измерительных приборов постоянного тока показывающего и самопишущего типа. Для исключения влияния колебаний напряжения осветительной сети установлен стабилизатор напряжения $Св$.

Лабораторные исследования показали, что при значительных колебаниях уровня испытуемого продукта изменяется интенсивность прохода воздуха через продукт при постоянном начальном его давлении, а это отражается заметно на величине перепада давления при одной и той же плотности продукта. Для устранения отрицательного влияния изменения уровня в рассматриваемой схеме применен гидравлический регулятор давления воздуха в виде трубы 3. Диаметр и степень погружения трубы 3 должны быть большими, чем у пневмотрубок датчика плотномера 1 и 2.

Давление подводимого сжатого воздуха в общей коммуникации устанавливается редукционным вентилем $В_1$ до величины, при которой при максимально возможном уровне продукта в аппарате воздух выходил бы отдельными пузырями из трубы гидравлического регулятора. Это

контролируется по зрительным сосудам 4 и 5. Давление воздуха устанавливается по манометру 6.

При понижении уровня в аппарате соответственно будет уменьшаться давление воздуха, поступающего в датчик плотномера, так как давление воздуха всегда будет равно давлению столба продукта в аппарате, ибо лишний воздух выходит из конца трубы регулятора. При этом скорость протекания воздуха через трубки датчика плотномера остается относительно постоянной, если пренебречь влиянием на скорость воздуха изменения плотности продукта, вследствие ничтожной величины этого влияния.

Температурная компенсация достигается путем установки в испытуемом продукте чувствительного электрического термометра сопротивления 15, включенного в систему моста таким образом, что при изменении плотности под влиянием изменения температуры продукта состояние моста не нарушается. В качестве вторичных приборов могут быть включены показывающие приборы 12 и 13, или самопишущий прибор 14.

На рис. 3 показана близкая предыдущей схема пьезометрического

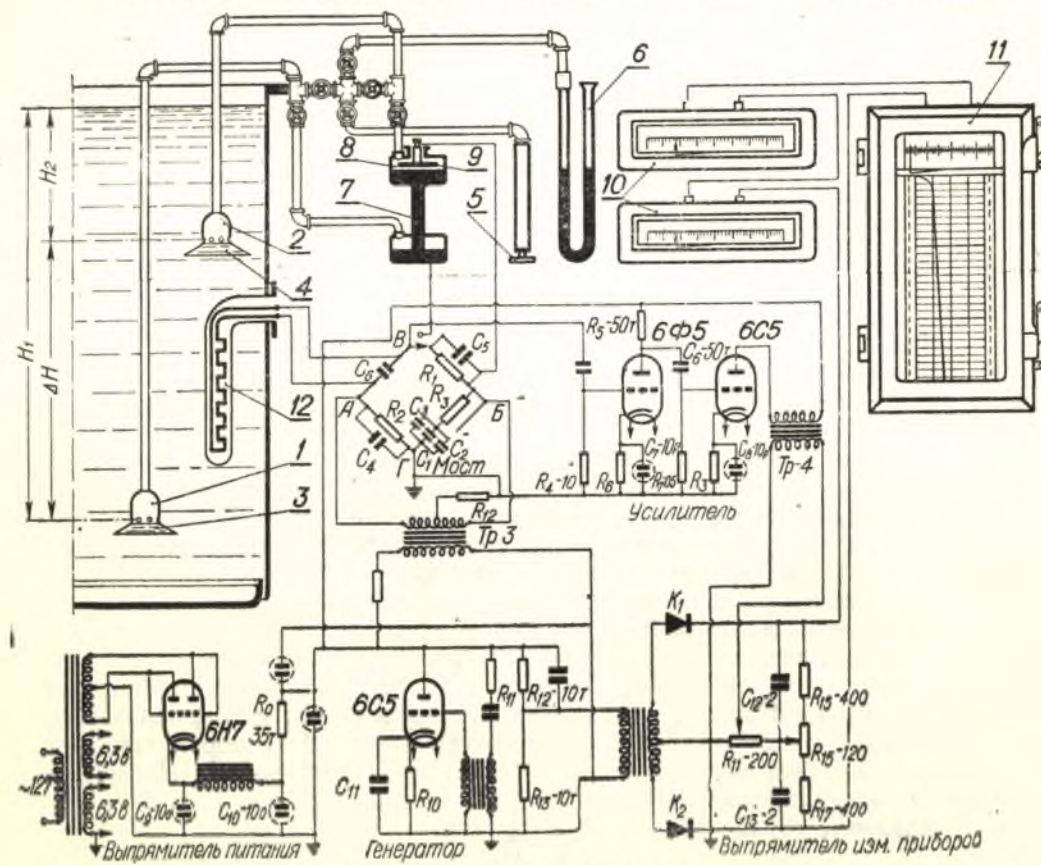


Рис. 3. Плотномер пьезометрического типа с использованием выделяющегося при спиртовом брожении углекислого газа.

плотномера, который может применяться в головных бродильных аппаратах непрерывно действующей бродильной батареи паточных спиртовых заводов, в которых имеет место интенсивное выделение углекислого газа.

В данном случае применены датчики плотнмера колокольного типа 1, 2, заполняемые газом в процессе брожения.

С целью увеличения площади улавливания газа колокола имеют основания расширенные зонты 3, 4. Избыток газа выходит через ряд отверстий в плоскости соединения зонты с колоколом. Давление газа под колоколами будет соответствовать весу столбов жидкости H_1 и H_2 над колоколами. Для первоначального заполнения системы газом или воздухом служит ручной насос 5 и манометр 6.

Дифференциальное давление измеряется также емкостным манометром, но другого типа. Здесь применен чашечный ртутный манометр 7 с верхним расширенным сосудом 8, внутри которого находится неподвижный металлический диск 9, служащий обкладкой конденсатора. Второй обкладкой служит поверхность ртути, перемещающаяся в зависимости от перепада давления. Температурная компенсация осуществляется включением в систему моста термометра сопротивления 12.

Балластный перепад давления измеряется столбом ртути в узкой части манометра, а полезный перепад давления, обусловленный изменением плотности испытуемого продукта, перемещает поверхность ртути в широкой части манометра.

На данной схеме плотнмера более подробно показаны элементы электрической схемы: выпрямитель, генератор с частотой порядка 800 герц, усилитель двухступенчатого типа и выпрямитель измерительных приборов¹. Собранный и проверенный катодным осциллографом электрическая схема дала хорошие результаты. Вторичные приборы 10 и 11 такие же, как и в схеме 2.

Как указывалось, в тех случаях, когда нежелателен или невозможен пропуск воздуха через испытуемый продукт по технологическим условиям, могут применяться плотнмеры с прямым измерением давления специальными приемниками.

На рис. 4 представлен пьезометрический дифференциальный плотнмер мембранного типа, устанавливаемый непосредственно в аппарате, а на рис. 5 такого же типа прибор, устанавливаемый на переточной коммуникации.

В данном приборе применены в качестве приемников давления мембранные коробки, покрытые эластичными тонкими резиновыми мембранами (колпаками). Датчик плотнмера состоит из двух мембранных коробок 1 и 3, установленных на специальной штанге, укрепленной внутри аппарата. От мембранных коробок отходят медные тонкие трубки к измерительному дифманометру 9.

Для компенсации балластного перепада давления в данном приборе применен компенсационный сосуд 7 с эталонной жидкостью и мембранным датчиком, аналогичным основному датчику. Нижняя мембранная коробка 3 плотнмера присоединена непосредственно к дифманометру, а верхняя 1 к мембранной коробке компенсатора 4, которая передает давление датчика через эталонную жидкость мембране 6. Последняя соединена с минусовой полостью дифманометра.

Давление столба эталонной жидкости

$$hD_3 = \Delta HD_{\text{мин}},$$

откуда

$$h = \frac{\Delta HD_{\text{мин}}}{D_3}. \quad (4)$$

¹ Измерительная электрическая схема собрана в основном по схеме М. Снегирева [12].

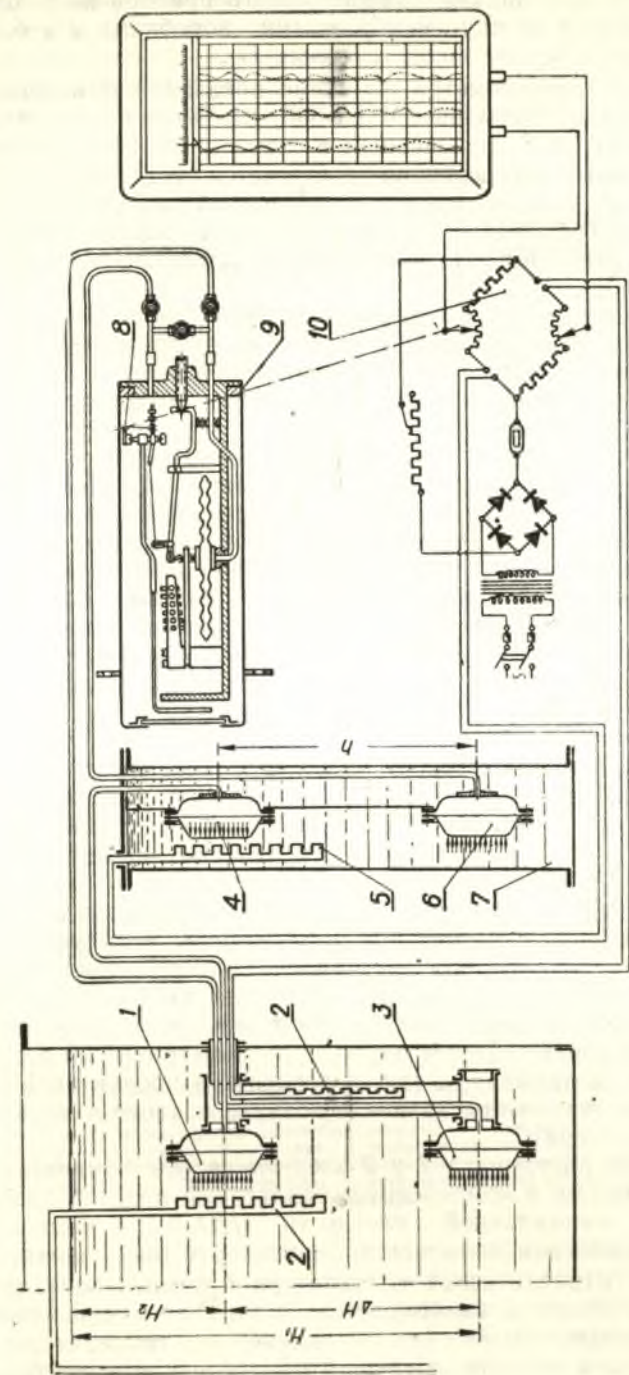


Рис. 4. Дифференциальный пьезометрический плотнмер мембранного типа, устанавливаемый непосредственно в аппарате.

Мембранный компенсатор балластного давления позволяет произвольно смещать нуль шкалы измерительного прибора посредством изменения расстояния h между мембранными коробками 4 и 6, или путем изменения плотности эталонной жидкости D_3 .

В качестве дифманометра на схеме показано применение типового мембранного тягонапоромера ТМПД-890, снабженного на оси указателя омическим датчиком 8, включенным в схему неравновесного моста 10.

Температурная компенсация достигается установкой термометров сопротивления 2 и 5 в среде и эталонной жидкости, включенных в схему моста. Термометр в испытуемой среде может быть установлен самостоятельно либо вмонтирован в штангу датчика (оба варианта показаны на схеме).

Данная схема позволяет применить любой дифманометр, рассчитанный на соответствующий перепад давления, например, типа кольцевых весов, колокольного типа, сильфонного типа и т. д.

На рис. 5 показана установка аналогичного мембранного плотномера на переточной коммуникации.

В тех случаях, когда по характеру испытуемой жидкости или по условиям температурного режима работы аппарата невозможно применение резиновых мембран, а также во технологическим условиям невозможно применение плотномеров с пропуском сжатого воздуха, разработан *пьезометрический плотномер мембранно-пневматического типа*; он работает по принципу измерения противодействия сжатого воздуха, подаваемого в систему прибора, которое уравнивает измеряемое давление испытуемой среды на металлические мембраны.

Схема такого прибора приведена на рис. 6. Плотномер смонтирован на вертикальном участке переточной коммуникации 4. На этом участке вварено три патрубка, закрываемые металлическими гофрированными мембранами. По другую сторону мембран присоединены воздушные камеры 1, 2 и 3. Верхние две камеры 1 и 2 служат датчиком плотномера, а нижняя камера 3 выполняет роль регулятора давления воздуха.

Принцип работы мембранно-пневматических камер состоит в том, он работает на принципе измерения противодействия сжатого воздуха, (противодействие по отношению к давлению столба жидкости), уравнивающее давление на мембраны со стороны испытуемого продукта. Это достигается тем, что при прогибе мембран под давлением продукта рычажная система прикрывает или открывает вход воздуха через сопла до тех пор, пока давление воздуха в камере не уравнивает давление продукта на мембраны. Таким образом, пьезометрический перепад давления в датчике плотномера, а также давление в продуктовой коммуникации на коробку регулятора давления воздуха полностью воспроизводится в воздушных камерах.

В патрубки плотномера 1 и 2 введены сосуды компенсаторов 5 и 6. Из них компенсатор 5 компенсирует балластный перепад давления, соответствующий минимальной плотности $\Delta H D_{\min}$, а компенсатор 6 является гидравлическим компенсатором температурных влияний.

Принцип гидравлической температурной компенсации, осуществленный в рассматриваемой схеме, состоит в том, что уменьшение плотности испытуемой среды, вызванное повышением ее температуры, компенсируется возросшим столбом эталонной жидкости в компенсационном сосуде 6 за счет ее расширения. Это добавочное давление столба эталонной жидкости прибавляется к соответствующей импульсной линии дифманометра.

Наличие регулятора давления сжатого воздуха 3 позволяет пропускать через систему плотномера воздух такого давления, какое эквивалентно давлению в переточной коммуникации в данный момент. Этим исключается погрешность измерения от колебаний уровня жидкости или общего давления в испытуемой системе. Для контроля интенсивности прохождения воздуха через компенсационные сосуды служат зрительные сосуды 15 и 16.

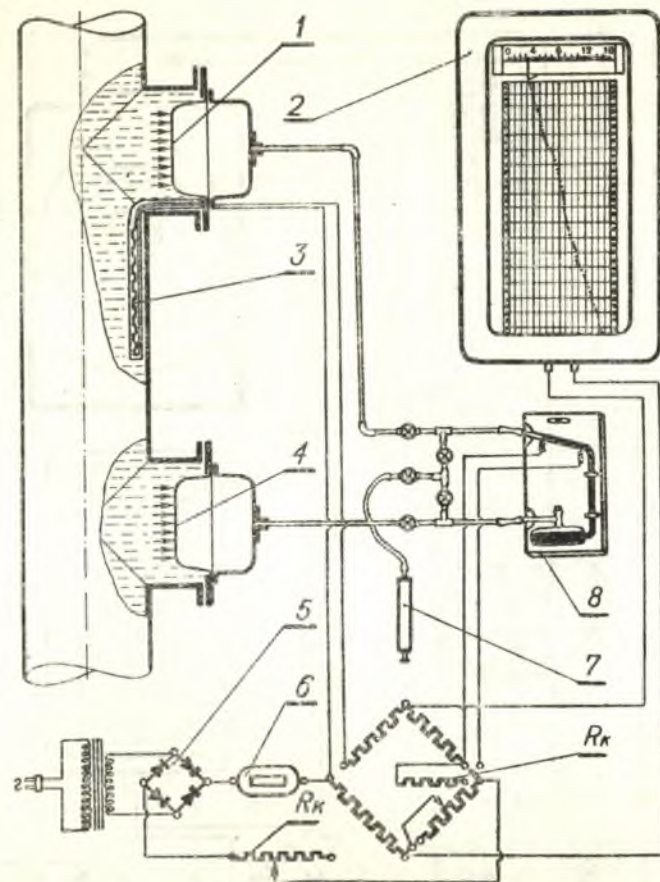


Рис. 5. Дифференциальный пьезометрический плотномер мембранного типа, устанавливаемый на переточной коммуникации. (1, 4—мембранные коробки приемника давления; 2—самопишущий гальванометр; 3—термометр сопротивления; 5—выпрямитель тока; 6—стабилизатор напряжения; 7—ручной насос; 8—дифференциальный манометр с омическим телепередатчиком; R_k —контрольное сопротивление моста; R —регулируемый реостат).

Так как воздушное пространство компенсатора балластного перепада давления 5 соединено через зрительный сосуд 7 с внутренним пространством камеры 1, а компенсатора температурных влияний 6 с пространством камеры 2 через зрительный сосуд 8, то давление в соединенных элементах будет одинаковым. При этом можно, не нарушая принципа работы камер 1 и 2, перенести калиброванные отверстия 9 и 10, выпускающие избыток воздуха в атмосферу, с воздушных камер на компенсационные сосуды (отверстия 11 и 12). Тогда имеем возможность, про-

пуская через барботирующие трубки 13 и 14 воздух из регулятора давления 3, скомпенсировать балластный перепад давления при помощи компенсатора 5 и температурные изменения плотности при помощи компенсатора 6. Дифманометр 17, подключенный к барботирующим трубкам 13 и 14, будет измерять перепад давления, обусловленный только изменением плотности испытуемой среды.

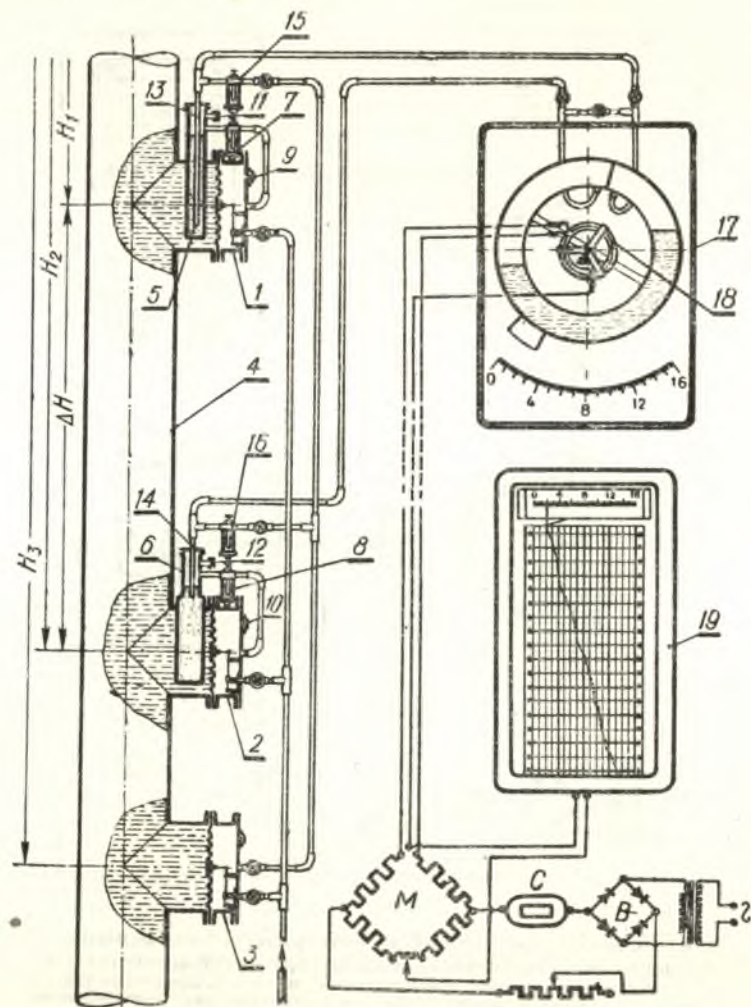


Рис. 6. Дифференциальный пьезометрический плотномер мембранно-пневматического типа (I вариант).

На схеме в качестве дифманометра показаны кольцевые весы 17, снабженные омическим передатчиком показаний 18 (кольцевой ртутной трубкой с платиновым сопротивлением). Измерительная электрическая схема состоит из неуравновешенного гальванометра самопишущего типа 19. Может быть подключен показывающий, контактный или регулирующий прибор.

На рис. 7 изображена подобного рода схема плотномера, отличающаяся от предыдущей тем, что сжатый воздух от регулятора давления подводится не только в барботирующие, как в схеме 6, трубки, но также и в камеры датчика плотномера. Кроме того, с целью более надежной и стабильной работы прибора, на воздушной коммуникации поставлены дроссельные шайбы вместо вентиля, так как не исключена возможность, что в процессе работы последние могут быть расстроены от ряда случай-

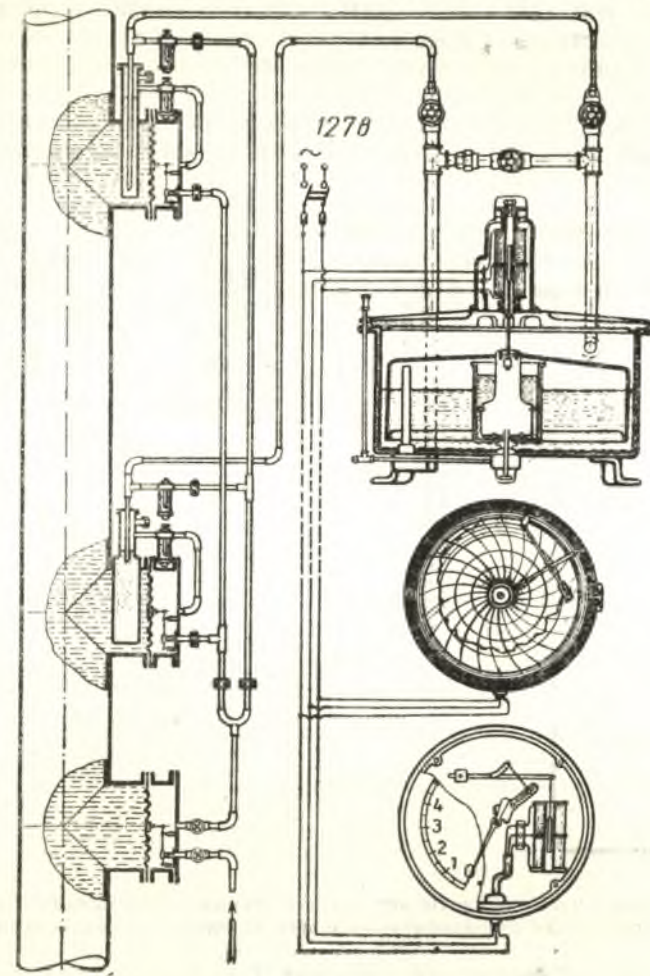


Рис. 7. Дифференциальный пьезометрический плотномер мембранно-пневматического типа (II вариант).

ных причин. В этой схеме применен дифманометр колокольного типа марки КЭМ с индукционным передатчиком показаний, а в качестве вторичных приборов типовые индукционные приборы Э-280 и Э-610. Плотномеры таких конструкций (рис. 6 и 7) позволяют производить пропаривание, дезинфекцию продуктовой линии без опасности нарушить состояние прибора. Также применимы такие приборы для измерения плотности неоднородных структурных жидкостей, содержащих примеси, взвешенные частицы и т. п.

По описанным выше типам пьезометрических плотномеров проведены лабораторные исследования, разработана методика их расчета, составлены расчетные уравнения, а также подробно исследованы методы компенсации балластного перепада давления, температурных влияний. Эти исследования и расчетные материалы позволили сконструировать приборы промышленного образца для их испытания в заводских условиях и последующего внедрения.

Приборы этих типов необходимы для автоматизации процессов спиртового производства, а также для автоматизации уфельных вакуум-аппаратов и выпарных аппаратов сахарного производства, над чем работает кафедра специального оборудования.

В некоторых случаях, в целях упрощения конструкции пьезометрического плотномера и его измерительной схемы, можно рекомендовать

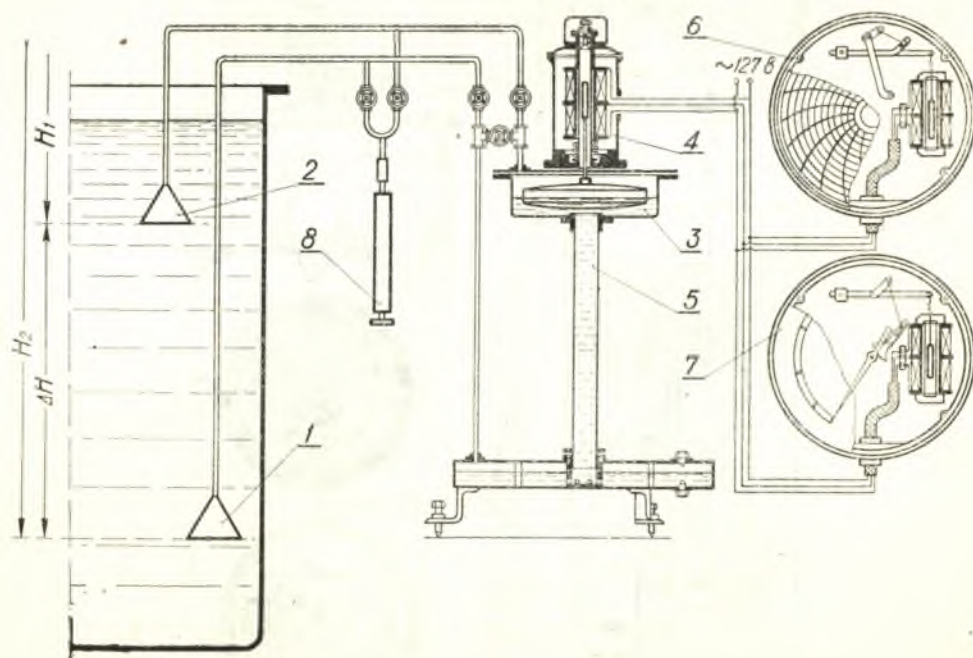


Рис. 8. Пьезометрический плотномер с колокольными приемниками давления и поплавковым дифманометром с индукционным передатчиком.

наиболее простые приемники давления 1 и 2 типа открытых колоколов (рис. 8), подключенные к жидкостному дифманометру 3, снабженному индукционным передатчиком показаний 4.

Особенностью дифманометра этого типа является компенсация балластного перепада давления при помощи соединительной вертикальной трубки 5 без необходимости прибегать к специальным компенсационным устройствам.

Как индукционный передатчик 4, так и вторичные приборы 6 и 7 являются типовыми, выпускаемыми нашей приборостроительной промышленностью.

Прибор, показанный на рис. 8, может применяться в бродильных аппаратах, где колоколы будут заполняться углекислым газом — продук-

том брожения. В других случаях нужно к системе колоколов подключить небольшой ручной насос 8 для периодической подкачки воздуха в систему.

Выводы

1. В результате работ, проведенных в области изучения и разработки методов автоматического измерения плотности продуктов и полупродуктов спиртового и сахарного производств, выбран дифференциальный пьезометрический (манометрический) метод измерения, как наиболее перспективный в отношении обеспечения высокой точности измерения плотности, удобный в эксплуатации и сравнительно простой в конструктивном решении. Кроме того, этот метод измерения плотности позволяет создать ряд таких модификаций приборов, какие могут быть применены в самых разнообразных производственных условиях.

2. Предложен ряд новых схем измерения и конструкций плотномеров, позволяющих устранить отрицательно влияющие на точность измерения факторы, как-то: балластный перепад давления, температурные влияния, колебания давления в испытуемой среде и т. д.

3. В результате проведенной работы созданы предпосылки для практического внедрения указанных автоматических плотномеров в производственную практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташев А. К. и Трофимовский Н. С. Прибор для непрерывного определения плотности сиропа, выходящего из последнего корпуса выпарки, Н. З. 34, 1933.
2. Файнберг М. М. Описание прибора для определения удельного веса жидкостей, Авторское свидетельство № 49444, класса 421, 1—9 мая 1935.
3. Соколов С. И. Устройство для измерения плотности жидкости в вакуумных выпарных аппаратах, Авторское свидетельство № 66468, класса 421, 103, 29 марта 1941.
4. Гмелин П. и Кренерт И. Контролирующие и регулирующие приборы в химической промышленности, 1937.
5. Словин Л. И. и Курицын А. К. Контрольно-измерительные установки на нефтезаводах, 1937.
6. Динабург А. М. Анализ методов измерения плотности и расчетные уравнения плотномеров, НИС по спирту КТИПП им. Микояна, 1937.
7. Скобло Д. И. и Динабург А. М. Автоматизация контроля и управления процессами брожения в спиртовом производстве, Труды КТИПП им. Микояна, в. 2.
8. Рой Ф. Ф. Прибор для непрерывного определения удельного веса жидкостей. Авторское свидетельство № 52697, класса 421, 1—2 июня 1936.
9. Божко Л. Ф. Устройство для непрерывного определения удельного веса жидкости, Авторское свидетельство № 75905, класса 421, 301, 10 февраля 1948.
10. Ламберт Л. Б. Аппарат для непрерывного определения удельного веса жидкости, «Химическая промышленность», № 2, 1947.
11. Карташев А. К. и Бранделис М. Н. Прибор для дистанционного измерения плотности известкового молока, «Сахарная промышленность», IV, № 4, 1949.
12. Снегирев М. «Электроника» в бумажной промышленности, «Радио», № 6, 1951.
13. Баранов Б. М. Какие приборы нужны для нефтедобычи? «Точная индустрия», № 2 1935.
14. Ламберт Л. Б. (Lambert L. B.) Continuous measurement of specific gravity. Apparatus for process control, «Chemical Age», v. 54, № 1400, 1946.
15. Каухерд Р. Д. (Cowherd R. D.) Application of the differential manometer to the measurement of fluid density and specific gravity with special reference to temperature effects, «Paper Trade Journal», v. 123, № 14, 1946.

(Получена редакцией 13 февраля 1952 г.)

Ст. преп. САБУРДО Г. А.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТАХОМЕТР С ОГРАНИЧЕННЫМ ПОДЪЕМОМ ЖИДКОСТИ

(Кафедра спецоборудования)

В лабораторной и производственной практике, а также при проведении экспериментальных исследований приходится измерять и непрерывно контролировать угловую скорость или число оборотов вращающихся приборов и аппаратов.

Достаточно удобным для этой цели, особенно в случае маломощных лабораторных аппаратов и моделей, является гидравлический тахометр. Такие тахометры применяются, например, для измерения числа оборотов лабораторных и экспериментальных центрифуг и сепараторов, в том числе в лабораториях молочных предприятий.

В этом простом приборе измерение числа оборотов в минуту или угловой скорости осуществляется по глубине воронки параболоида вращения

$$\frac{h}{2} = \frac{\omega^2 r^2}{4g}, \quad (1)$$

который образует свободная поверхность жидкости в стеклянном цилиндре, установленном вертикально по оси сепаратора, центрифуги или вообще быстро вращающегося аппарата. Отсчет показаний такого тахометра должен производиться именно по дну (глубине) воронки параболоида, а не по совершенно неясной границе подъема жидкости у стенок цилиндра, хотя последнее мнение встречается в литературе.

Однако этот обычный гидравлический тахометр, в котором жидкость свободно поднимается вдоль стенок цилиндра, имеет ряд существенных недостатков, из которых важнейшими являются следующие:

- а) неравномерность шкалы и сложность градуировки,
- б) значительная высота цилиндра трубки тахометра, особенно при измерении больших чисел оборотов,
- в) различная точность измерения: наибольшая при больших и наименьшая при малых числах оборотов.

В связи с этим значительно более совершенным представляется гидравлический тахометр, в котором высота подъема жидкости в стеклянном цилиндре ограничена, т. е. исключен характерный для обычного гидравлического тахометра принцип свободного подъема жидкости.

В этом тахометре стеклянный цилиндр с жидкостью закрыт плотно сверху на определенной высоте так, что жидкость, поднимаясь по мере увеличения ω , упирается в крышку АВ (см. рис).

Дадим прежде всего теорию такого указателя числа оборотов (тахометра).

Рассматривая равновесие жидкости в трубке гидравлического тахометра этого типа, можем написать следующие два уравнения.

Первое, вытекающее непосредственно из условий равновесия частиц жидкости на ее свободной поверхности под действием центробежной силы и силы тяжести:

$$h = \frac{\omega^2 r_1^2}{2g} \quad (2)$$

Второе, вытекающее из условия постоянства объема, отведенного для поднимающейся жидкости и воздуха в трубке тахометра:

$$V = V_{ж} + V_{в} = \text{const},$$

откуда получаем:

$$\frac{r_1^2 h}{2} = r^2 (H - h_0). \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3), получим:

$$h = r \sqrt{\frac{H - h_0}{g}} \omega, \quad (4)$$

где:

h — глубина воронки параболоида вращения, отсчитываемая от поверхности крышки прибора,

r — внутренний радиус цилиндра тахометра,

H — его внутренняя высота,

h_0 — начальная высота уровня жидкости в трубке прибора (при $\omega = 0$),

g — ускорение силы тяжести,

ω — угловая скорость вращения в 1/сек.

Заменяя $H - h_0 = h_1$, получим:

$$h = r \sqrt{\frac{h_1}{g}} \omega, \quad (5)$$

где h_1 — расстояние от поверхности крышки до свободной поверхности жидкости при покое ($\omega = 0$).

Переходя к глубине воронки параболоида вращения, отсчитываемой от начального уровня жидкости в трубке тахометра, получим:

$$h_2 = r \sqrt{\frac{h_1}{g}} \omega - h_1. \quad (6)$$

Из полученных зависимостей видно, что для тахометра с ограниченным подъемом жидкости зависимость между глубиной воронки параболоида вращения и угловой скоростью (или числом оборотов) линейная, в отличие от параболической зависимости для обычного гидравлического тахометра (1). Таким образом, шкала тахометра с ограниченным подъемом жидкости получается равномерной и, следовательно, тахометр дает одинаковую точность для всего интервала измеряемых значений ω или n .

Градуировка тахометра осуществляется легко и просто на основании уравнений (5) или (6), причем предварительно вычисляется коэффициент

$$r \sqrt{\frac{h_1}{g}} \quad \text{или} \quad kr \sqrt{h_1} \quad (5a \text{ и } 6a).$$

Еще легче построить полученную зависимость графически, для чего потребуется вычислить лишь только одно значение $h = f(\omega)$ или $h_2 = f_1(\omega)$ (вторым значением будет $h = 0$ или $h_2 = -h_1$, при $\omega = 0$). Полученная прямая позволит быстро проградуировать тахометр. В то же время для обычного тахометра приходится вычислять все значения $h = f(\omega)$ или $h_2 = f_1(\omega)$, причем графическое построение параболы не дает никаких преимуществ, и только построение графика в логарифмической сетке координат облегчает задачу.

При градуировке тахометра с ограниченным подъемом жидкости необходимо иметь в виду, что он дает равномерную шкалу только начиная со значений $h = 2h_1$, чему соответствует

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{2gh}}{r} \quad \text{или} \quad \omega_1 = \frac{2\sqrt{gh_1}}{r}, \quad (7)$$

т. е. с того момента, когда поднимающаяся у стенок жидкость достигнет поверхности крышки тахометра или высоты h_1 . До этого значения угловой скорости зависимость между ω и h дается формулой (1) или формулой

$$h_2 = \frac{\omega^2 r^2}{4g}. \quad (1a)$$

Таким образом, при малых значениях угловой скорости глубина воронки параболоида вращения возрастает наиболее быстро (пропорционально ω^2), а затем, начиная со значений

$$\omega_1 = \frac{2\sqrt{gh_1}}{r},$$

шкала прибора становится равномерной.

В зависимости от конкретно измеряемого диапазона угловых скоростей (чисел оборотов), шкалу тахометра можно сделать равномерной, начиная с любого значения ω , варьируя в известных пределах радиусом цилиндра r и главным образом — высотой h_1 свободного пространства над поверхностью жидкости в цилиндре прибора при $\omega = 0$.

Можно также, варьируя h_1 и главным образом радиусом цилиндра r , получить практически любую цену деления шкалы тахометра, в пределах целесообразных размеров прибора. Все это позволяет обеспечить надлежащую точность измерения ω или n на интересующем интервале их значений. В то же время при градуировке обычного гидравлического тахометра уменьшение цены деления возможно только

за счет увеличения радиуса цилиндра прибора и потому весьма ограничено, так как это приводит к значительному увеличению и без того большой высоты прибора.

Если желательно проградуировать прибор непосредственно в числах оборотов, то удобно воспользоваться соответственно преобразованными формулами.

При переходе к числу оборотов в минуту, полученные выше формулы приобретут вид:

$$h = kr \sqrt{h_1} n. \quad (5a)$$

$$h_2 = kr \sqrt{h_1} n - h_1. \quad (6a)$$

$$n_1 = \frac{2}{k} \sqrt{h_1}. \quad (7a)$$

В этих формулах коэффициент $k = \frac{\pi}{30Vg} = 0,00334$, причем h, h_1, h_2 и r должны быть выражены в сантиметрах.

Подводя итог, укажем на преимущества гидравлического тахометра с ограниченным подъемом жидкости по сравнению с обычным гидравлическим тахометром:

1. Равномерность шкалы и, следовательно, одинаковая точность измерения различных по величине угловых скоростей или чисел оборотов.

2. Простота расчета, удобство и легкость градуировки.

3. Возможность получения равномерной шкалы для любого интервала значений ω или n и возможность осуществления их измерения с надлежащей точностью.

4. Применимость для достаточно точного измерения небольших угловых скоростей или чисел оборотов, при умеренных (нормальных) габаритах прибора.

5. Значительно меньшая высота прибора даже и при пониженной цене делений, т. е. при повышенной точности измерения.

6. Меньшее влияние трения слоя частиц жидкости на поверхности параболоида вращения о прилегающий воздух.

(Получена редакцией 4 марта 1952 г.).

Доц. ПАВЛОВ И. С.,
кандидат технических наук

О ТЕПЛОВЫХ КОНСТАНТАХ САХАРА

(Кафедра физики)

Знание тепловых констант сахара необходимо для расчета многих процессов сахарного производства. Однако, трудности в определении этих констант приводят к тому, что количество оригинальных работ, посвященных данному вопросу, крайне невелико, и, обычно, исследователи ссылаются на предыдущие изыскания, не подвергая их критической проверке. Одни и те же источники цитируются в различных работах.

Особенно часто упоминается работа Яновского и Архангельского [1] по изучению теплоемкости сахара. Можно найти немало примеров использования этой работы в отечественной и зарубежной литературе.

Авторы [1] дают значение теплоемкости сахара в виде:

$$C_t = 0,2775 + 0,00085t, \quad (1)$$

где C_t — теплоемкость сахара в $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ при температуре t (по Цельсию).

Значения, получаемые по этой формуле, не вызывают больших сомнений, поскольку цифры, добытые другими способами, имеют, примерно, ту же величину. Так, по данным Водогинского [2], подкрепляемым расчетом по атомным теплоемкостям, удельная теплоемкость сахарозы порядка $0,3 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$.

Резцов [3], определяя теплоемкость сахарного песка, нашел ее равной $0,284 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$.

Однако, знание одной теплоемкости недостаточно для характеристики тепловых свойств вещества, поэтому в современных теориях пользуются также коэффициентами теплопроводности, температуропроводности и теплоусвоемости. Впрочем, два последних коэффициента могут быть вычислены, если известны теплоемкость и теплопроводность вещества. Поэтому определение коэффициента теплопроводности становится обязательным.

Лепилкин, изучая теплопроводность сахарных растворов [4], путем экстраполяции пришел к следующей формуле:

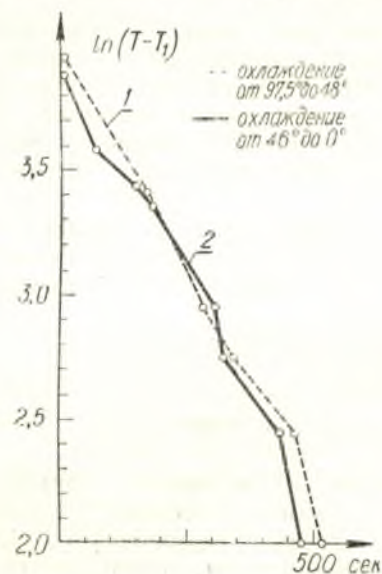
$$\lambda_t = 0,1637 + 0,0034t \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}, \quad (2)$$

где λ_t — теплопроводность сахара при температуре t (по Цельсию).

Неоправданная экстраполяция автора [4] вызывает сомнение в справедливости этой формулы, что заставило нас провести самостоятельные опыты по измерению теплопроводности сахара. Наблюдения велись по методу регулярного режима [5].

Для этой цели был изготовлен цилиндр из сахара-рафинада, заключенный в тонкую металлическую оболочку. На середине оси цилиндра был заделан шарик терморпары, с помощью которой измерялась температура сахара в этом месте. Сначала цилиндр был нагрет в горячей воде до температуры $97,5^\circ$, после чего цилиндр помещался в термостат с теплой водой (температура 48°). С помощью терморпары наблюдалось охлаждение рафинада, пока он не приобрел температуру термостата. После этого цилиндр был перенесен в тающий лед, и здесь также наблюдался процесс охлаждения. Таким образом были получены два ряда наблюдений за остыванием рафинада: в промежутке от $97,5^\circ$ до 48° и в промежутке от 48° до 0° .

Эти наблюдения представлены на рисунке в полулогарифмических координатах. Из графика видно, что по прошествии трех минут после начала охлаждения в обоих случаях зависимость между логарифмом температуры и временем можно считать линейной.



Выбирая в качестве прямолинейных участков интервалы температур $92,5^\circ - 55,5^\circ$ и $26,5^\circ - 7,5^\circ$ и обрабатывая данные наблюдений по способу наименьших квадратов, находим формулы:

для первого случая —

$$\ln(t_e - t_0) = 3,97 - 0,0036\tau, \quad (3)$$

для второго —

$$\ln(t_e - t_0) = 4,08 - 0,0041\tau, \quad (4)$$

где:

t_e — температура сахара,

t_0 — температура охлаждающей среды,

τ — время от начала наблюдения в секундах.

Формулы (3) и (4) дают следующие значения угловых коэффициентов для кривых охлаждения в полулогарифмической анаморфозе: при средней температуре $74^\circ - 13,0$ 1/час, $17^\circ - 14,8$ „

В теории регулярного режима устанавливается, что полученные коэффициенты связаны с коэффициентом температуропроводности таким соотношением:

$$a = km, \quad (5)$$

Здесь:

m — найденный угловой коэффициент,

a — коэффициент температуропроводности,

k — коэффициент формы.

Последний для образцов цилиндрической формы может быть найден из формулы:

$$\frac{1}{k} = \frac{(2,405)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}, \quad (6)$$

где: L — длина и R — радиус цилиндра.

Коэффициент формы для нашего образца равен $6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Пользуясь этими данными, находим коэффициент температуропроводности:

$$a = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{час} \text{ при средней температуре } 74^\circ \text{ и}$$

$$a = 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{час} \text{ „ „ „ „ } 17^\circ.$$

Как известно, коэффициент теплопроводности λ связан с найденными значениями соотношением:

$$a = \frac{\lambda}{C\gamma} \quad (7)$$

где: C — теплоемкость, а γ — объемный вес материала (для нашего образца $\gamma = 1230 \text{ кг/м}^3$).

Используя формулы (1) и (7) и пренебрегая тепловым расширением сахара, найдем:

$$\lambda_{74} = 0,365 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}, \quad \lambda_{17} = 0,355 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}.$$

Полученные данные говорят о том, что теплопроводность сахара-рафинада в изученных пределах порядка $0,36 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$. Что же касается зависимости теплопроводности от температуры, то эта зависимость столь незначительна, что точность применяемого метода регулярного режима не дает возможность оценить с необходимой достоверностью величину температурного коэффициента теплопроводности.

По формуле (2) находим следующие значения:

$$\lambda_{74} = 0,4153, \quad \lambda_{17} = 0,2205.$$

При достаточно близком совпадении средней теплоемкости в указанном пределе температур формула (2) дает большую разницу в теплоемкостях при разных температурах. Очевидно, значение температурного коэффициента в формуле (2) является завышенным. Поэтому сравнительно малой получается теплопроводность сахара при низкой температуре. Для сравнения можно указать на приводимые в Справочнике „Технической энциклопедии“ измерения Эйкена [6], который нашел, что теплопроводность кристалла сахара при 0° равна $0,00139 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$, или в переводе на общепринятые в технике единицы $0,5004 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$.

Необходимо указать, что теплопроводность сахара-рафинада должна быть несколько меньше последней цифры, так как между кристаллами сахара в рафинаде заключается воздух — вещество более теплоинерционное, чем сахар-кристалл.

Упомянутый ранее Резцов [3] определял теплопроводность сахарного песка с объемным весом 928 кг/м^3 . Она оказалась равной $0,1135 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$.

Теплопроводность сахарного песка, в соответствии со сказанным, должна увеличиваться при прессовании, что подтвердили опыты Шандера и Мирчева [7].

В условиях, когда результаты измерений, полученных различными методами, сильно разнятся между собою, когда недостаточно изучена зависимость тепловых свойств сахара от других факторов, погоня за излишней точностью является не оправданной. „Точные“ цифры окажутся малодостоверными. Поэтому, ограничиваясь точностью в 10%,

что соответствует точности метода регулярного режима и является достаточным для заводской практики, и сопоставляя все приведенные данные, приходим к заключению, что для промежутка температур $20^{\circ} - 80^{\circ}$ можно принять следующие средние значения тепловых констант сахара-рафинада:

теплоемкость — $0,3 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$,
 теплопроводность — $0,4 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$,
 температуропроводность — $9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{час}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский В. В. и Архангельский П. А. Теплоемкости заводских сахарных растворов и кристаллического сахара, «Сахарная промышленность», № 7—8, 1929.
2. Водогинский В. Э. Теплоемкость пищевых веществ и пищевых продуктов, 1937.
3. Резцов Н. Г. Определение теплопроводности строительных материалов, 1941.
4. Лепилкин А. Н. Определение теплопроводности сахарных растворов, Труды ЦИНС, № 1, вып. XXI, 1939.
5. Кондратьев Г. М. Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима, 1936.
6. Эйкен А. (Eucken A.), Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle, Annalen der Physik, 34, 186, 1912.
7. Шандера и Мирчев (Šandera, Mirčev). Теплопроводность сахара. (Из работ Чехословацкого института сахарной промышленности), Н. 3, кн. 52—53, 1934.

(Получена редакцией 28 марта 1952 г.)

Проф. НАУМОВ А. Л.,
 доктор технических наук

СВЯЗЬ МЕЖДУ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН И МЕТОДОМ КРУГОВЫХ ДИАГРАММ

(Кафедра физики)

1. В предыдущих статьях [1, 2] был предложен аналитический метод расчета работы трехфазных асинхронных машин, состоящий в следующем.

На основании испытания машины определяются величины фазового тока и активной мощности одной фазы статора при холостом ходе (или синхронной скорости) и одной какой-либо нагрузке этой машины (например, при коротком замыкании).

По этим данным вычисляются три обозначаемые через r_1 , σ и r_2 параметра, характеризующие работу машины, и называемые соответственно коэффициентом электрических потерь, коэффициентом магнитного рассеяния и коэффициентом асинхронности. Для более полного исследования работы машины можно определить еще четвертый характеристический параметр, обозначаемый ρ и называемый коэффициентом механических потерь. В этом случае следует измерить также величину момента сил трения на валу машины.

Зная параметры r_1 , σ , r_2 и ρ исследуемой машины, можем определить по приведенным в статьях формулам все величины, характеризующие тот или другой режим работы машины — двигательный, генераторный или тормозный. А именно, можно определить в относительных единицах величины активной и реактивной мощности, фазового тока, вращающего момента и коэффициента полезного действия в зависимости от скольжения. Можно исследовать также различные оптимальные режимы.

Что же касается единичных (масштабных) величин тока, мощности и вращающего момента исследуемой машины, то они определяются следующим образом.

Единичным током i_0 является просто фазовый ток холостого хода, или, более точно, ток, равный $\frac{i_{\text{син}}}{\sin \varphi_{\text{син}}}$, где $i_{\text{син}}$ и $\cos \varphi_{\text{син}}$ — фазовый ток и коэффициент мощности машины при вращении ротора с синхронною скоростью.

Величины единичной (масштабной) мощности и единичного (масштабного) вращающего момента определяются соответственно выражениями $U i_0$ и $\frac{3p}{\omega} U i_0$, где U — номинальное фазовое напряжение, ω — круговая частота и p — число пар полюсов.

В данной статье устанавливается связь между этим аналитическим методом исследования работы трехфазных асинхронных машин и графическим методом круговых диаграмм.

2. Активная и реактивная мощности P_{1a} и P_{1p} одной фазы статора трехфазной асинхронной машины определяются по формулам (см. формулы (8) и (9) упомянутой выше статьи [2]):

$$P_{1a} = \frac{\xi(1-\sigma) + r_1(1+\xi^2)}{(1+\xi r_1)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} i_0 U$$

и

$$P_{1p} = \frac{1 + \sigma\xi^2}{(1 + \xi r_1)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} i_0 U,$$

где $\xi = \frac{s}{r_2}$ является приведенным скольжением машины, определяемым путем деления ее обычного скольжения s на коэффициент асинхронности r_2 .

Так как

$$P_{1a} = UI \cos \varphi, \quad P_{1p} = UI \sin \varphi,$$

где φ — угол отставания по фазе вектора фазового тока \bar{I} от вектора фазового напряжения \bar{U} , то из предыдущих соотношений будем иметь следующие выражения для составляющих I_1 и I_2 тока \bar{I} в направлении, нормальном вектору \bar{U} и в направлении коллинеарном с \bar{U} :

$$\left. \begin{aligned} I_1 = I \sin \varphi &= \frac{1 + \sigma\xi^2}{(1 + r_1\xi)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} i_0 \\ I_2 = I \cos \varphi &= \frac{\xi(1 - \sigma) + r_1(1 + \xi^2)}{(1 + r_1\xi)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} i_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Расположим начало вектора \bar{U} в начале O плоской координатной системы XOY и направим этот вектор по оси ординат.

Построив, далее, в точке O вектор тока \bar{I} , соответствующий некоторому режиму работы (некоторому значению приведенного скольжения ξ), заметим, что координаты конца этого вектора во взятой координатной системе будут I_1 и I_2 .

Для нахождения геометрического места концов векторов фазовых токов \bar{I} , соответствующих разным режимам работы, надо найти зависимость между I_1 и I_2 , не содержащую других переменных величин; другими словами, надо исключить ξ из соотношений (1).

Прежде всего имеем:

$$I_1^2 + I_2^2 = \frac{1 + \xi^2}{(1 + \xi r_1)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} i_0^2. \quad (1a)$$

Далее, представим дробь правой части в виде:

$$\frac{1 + \xi^2}{(1 + \xi r_1)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2} = a \frac{I_1}{i_0} + b \frac{I_2}{i_0} + c, \quad (16)$$

где a , b и c — подлежащие определению величины.

Приводя к общему знаменателю и пользуясь (1), получаем:

$$1 + \xi^2 = a(1 + \sigma\xi^2) + b[\xi(1 - \sigma) + r_1(1 + \xi^2)] + c[(1 + \xi r_1)^2 + (\sigma\xi - r_1)^2].$$

Приравнявая коэффициенты при разных степенях ξ в левой и правой частях, приходим к трем уравнениям относительно трех искомых величин a , b и c :

$$\begin{aligned} a\sigma + br_1 + c(r_1^2 + \sigma^2) &= 1, \\ b(1 - \sigma) + 2cr_1(1 - \sigma) &= 0, \\ a + br_1 + c(1 + r_1^2) &= 1. \end{aligned}$$

Отсюда находим:

$$a = \frac{1 + \sigma}{\sigma + r_1^2}, \quad b = \frac{2r_1}{\sigma + r_1^2}, \quad c = -\frac{1}{\sigma + r_1^2}.$$

Подставляя в (16) эти значения величин a , b и c и заменяя еще левую часть на $\frac{1}{i_0^2}(I_1^2 + I_2^2)$ согласно (1a), будем иметь:

$$\frac{1}{i_0^2}(I_1^2 + I_2^2) = \frac{1 + \sigma}{\sigma + r_1^2} \frac{I_1}{i_0} + \frac{2r_1}{\sigma + r_1^2} \frac{I_2}{i_0} - \frac{1}{\sigma + r_1^2}.$$

Таким образом, геометрическим местом концов векторов токов \bar{I} является окружность.

Представив полученное уравнение окружности в обычном виде

$$\left(I_1 - \frac{1 + \sigma}{2(\sigma + r_1^2)} i_0\right)^2 + \left(I_2 - \frac{r_1}{\sigma + r_1^2} i_0\right)^2 = \left(\frac{1 - \sigma}{2(\sigma + r_1^2)} i_0\right)^2, \quad (2)$$

мы приходим к заключению, что координаты центра рассматриваемой окружности (x_c, y_c) равны

$$x_c = \frac{1 + \sigma}{2(\sigma + r_1^2)} i_0, \quad y_c = \frac{r_1}{\sigma + r_1^2} i_0 \quad (3)$$

и радиус R этой окружности равен:

$$R = \frac{1 - \sigma}{2(\sigma + r_1^2)} i_0. \quad (4)$$

Таким образом, если найдены параметры машины r_1 и σ , а также ее единичный ток, то можно построить окружность, являющуюся геометрическим местом концов векторов токов \bar{I} , пользуясь формулами (3) и (4).

Наоборот, можно, построив окружность токов на основании обычного метода построения круговой диаграммы, определить параметры машины r_1 и σ , а также ее единичный ток i_0 следующим образом.

Деля первую формулу (3) на (4) и определяя отсюда σ , получим:

$$\sigma = \frac{x_c - R}{x_c + R}. \quad (5)$$

Деля вторую формулу (3) на формулу (4), определяя r_1 и исключая σ при помощи формулы (5), получаем далее:

$$r_1 = \frac{y_c}{x_c + R}. \quad (6)$$

Наконец, из второй формулы (3) получаем:

$$i_0 = -\frac{\sigma y_c}{r_1} + r_1 y_c.$$

И на основании (4) и (5):

$$i_0 = x_c - R + \frac{y_c^2}{x_c + R}. \quad (7)$$

Поэтому, измерив на чертеже (рис. 1) величины отрезков $AB = x_c - R$, $AE = x_c + R$ и $DC = y_c$, можем определить σ , r_1 и i_0 следующим образом:

$$\sigma = \frac{AB}{AE}, \quad r_1 = \frac{CD}{AE},$$

$$i_0 = AB + \frac{CD^2}{AE}.$$

3. Формулами (3) и (4) можно воспользоваться для разработки метода построения окружности токов (2) по испытанию холостого хода и одной какой-либо частной нагрузки (необязательно короткого замыкания).

Взяв за масштаб построения величину единичного тока i_0 , представим формулы (3) и (4) в виде:

$$\zeta_c = \frac{1 + \sigma}{2(\sigma + r_1^2)}, \quad \eta_c = \frac{r_1}{\sigma + r_1^2}, \quad \rho = \frac{1 - \sigma}{2(\sigma + r_1^2)},$$

где $\zeta_c = \frac{x_c}{i_0}$, $\eta_c = \frac{y_c}{i_0}$, $\rho = \frac{R}{i_0}$ — координаты центра и радиус окружности (2) в этих относительных единицах.

Исключая из трех только что написанных формул величины r_1 и σ , получим следующее соотношение между значениями ζ_c , η_c и ρ :

$$\zeta_c^2 + \eta_c^2 - \rho^2 = \zeta_c + \rho.$$

Это соотношение представим в виде:

$$\left(\zeta_c - \frac{1}{2}\right)^2 + \eta_c^2 = \left(\rho + \frac{1}{2}\right)^2$$

Отсюда можно сделать такое заключение: центр $C(\zeta_c, \eta_c)$ окружности токов лежит на окружности радиуса $\rho + \frac{1}{2}$ с центром в точке $\left(\frac{1}{2}, 0\right)$.

Это заключение приводит к следующему приему построения окружности (2) по экспериментально найденным ее двум точкам и по известному значению единичного тока i_0 . Будем строить окружность (2) снова в абсолютных единицах (амперах), а не в относительных.

Измерив фазовые ток и мощность статора при двух частных на-

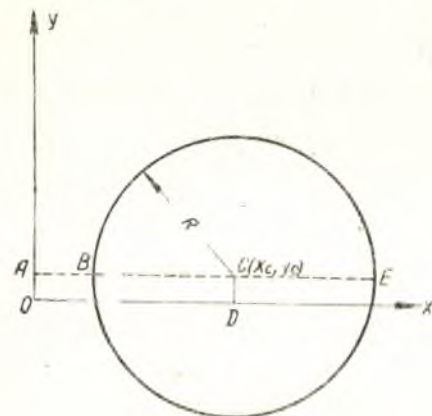


Рис. 1.

грузках (например, при холостом ходе и коротком замыкании), строим вектора токов \vec{i}_1 и \vec{i}_2 , соответствующие этим нагрузкам (на рис. 2 концы этих векторов обозначены через i_1 и i_2).

Затем проводим, как обычно, прямую $i_1 i_2$ и через ее середину D проводим перпендикуляр. Центр C искомой окружности, конечно, должен лежать на этом перпендикуляре.

Для окончательного установления места нахождения этого центра остается заметить следующее его свойство, вытекающее из только что полученного результата (рис. 2):

Если из центра C провести окружность радиуса CK , равного Ci_1 (или Ci_2) плюс половина тока

i_0 ($Ki_1 = \frac{i_0}{2}$), то эта окружность пересечет ось абсцисс в точке A , находящейся от начала O на расстоянии $OA = \frac{i_0}{2}$.

4. В заключение отметим следующее. Испытание машины для определения ее характеристических параметров должно проводиться весьма тщательно и точно, так как относительная погрешность в 1—2% в значениях номинального тока и номинальной мощности может привести к относительной погрешности в значениях потерь в десятки раз большей.

Ведь величины различных потерь в машине сами являются величинами порядка нескольких процентов от соответствующих номинальных величин, характеризующих ее работу. Такая же относительная погрешность получится и в найденных значениях параметров r_1 и σ , поскольку эти параметры характеризуют потери в машине.

В необходимости иметь точные, тщательно измеренные исходные данные при определении характеристических параметров, убеждаемся непосредственно на практике как путем вычисления этих параметров по формулам (3)—(7) упомянутой выше статьи (куда входят разности близких чисел), так и применяя указанный на рис. 2 графический метод.

Изменение магнитного насыщения машины также сильно отражается на значениях ее характеристических параметров.

Поэтому, имеет смысл определить эти параметры при нескольких режимах работы—номинальном двигательном режиме, коротком замыкании, режиме генераторном, а затем взять рационально выбранные средние значения, или же пользоваться на различных интервалах работы машины разными соответствующими этим режимам значениями характеристических параметров, учитывая таким образом изменение магнитного насыщения.

При графическом исследовании можно построить для различных режимов работы отдельные участки окружностей токов с соответ-

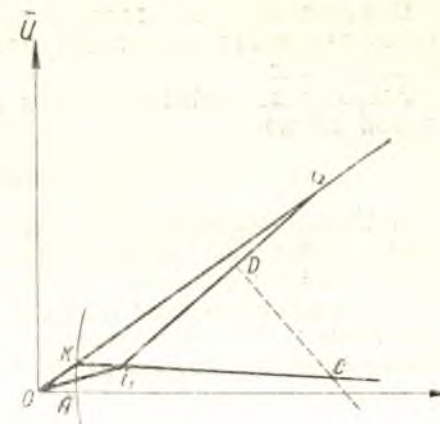


Рис. 2.

вующими центрами и радиусами, а затем интерполировать все построенные таким образом дуги окружностей в плавную замкнутую линию.

Отклонение этой линии от окружности будет характеризовать степень изменения магнитного насыщения машины при разных режимах ее работы.

Затронутые сейчас вопросы будут подробнее исследованы в отдельной статье.

Выводы

1. Устанавливается связь между методами расчета работы трехфазных двигателей: предложенным аналитическим методом и графическим методом круговых диаграмм.

2. Предложен метод построения уточненной круговой диаграммы по значениям характеристических параметров двигателя и метод определения этих параметров из круговой диаграммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумов А. Л. Аналитическая теория асинхронной машины, Математический сборник Киевского государственного университета, № 5, 1951.
2. Наумов А. Л. Аналитический метод исследования работы трехфазных асинхронных машин, Труды КТИПП им. Микояна, в. II.

(Получена редакцией 5 февраля 1952 г.).

Доц. БОРОДЯНСКИЙ М. Я.,
кандидат технических наук

РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМ

(Кафедра сопротивления материалов и теоретической механики)

Связь между линейными перемещениями узлов вдоль добавочных стержней и их составляющими в радиальном, тангенциальном и вертикальном направлениях

Рассмотрим рамную пространственную циклически-симметричную систему (рис. 1). К таким рамам относятся сооружения каркасного типа, имеющие в плане форму правильного многоугольника и состоящие из жестко связанных между собой в узлах стержней, расположенных в меридиональных и параллельных плоскостях.

Ко всем узлам каждого этажа приложены равные, вообще говоря, не только вертикальные нагрузки (на рис. 1 они не показаны), находящиеся в меридиональных плоскостях. Нагрузки каждого этажа могут отличаться друг от друга.

Количество граней в каждом кольце обозначим буквой n , а количество этажей (колец) буквой m . В каждом узле имеется четыре неизвестных деформации — три угла поворота $\varphi^r, \varphi^t, \varphi^v$ вокруг координатных осей r, t, v и одно линейное смещение δ вдоль ригеля; для определения критической нагрузки, пользуясь методом перемещений, придется составить и раскрыть определитель, порядок которого равен $4mn$.

Чтобы превратить систему (рис. 1) в „основную“, достаточно закрепить все ее узлы горизонтальными стержнями, идущими по направлению ригелей (рис. 2, 5). Для установления связи между деформациями узлов системы воспользуемся принципом возможных перемещений.

Рассмотрим узел номер k этажа номер i , обозначим этот узел через k, i . От приложения к нему в горизонтальной плоскости силы I , направленной вдоль координатной оси t (по касательной к описанной вокруг многоугольника окружности), появятся усилия только в ригеле $k, i-k+1, i$ и в двух добавочных креплениях этих узлов (рис. 3). Во всех остальных элементах системы от данной силы I усилия будут равны нулю.

В действительности, все элементы вышележащих этажей не работают из-за отсутствия нагрузки выше i -того этажа. Во всех ребрах, соединяющих i -тое кольцо с нижележащим, усилия также равны нулю, что видно из условия проекции всех сил каждого узла (идя сверху вниз) на вертикальную ось. Так как эти ребра не работают, то они, в свою очередь, не передают никаких усилий нижеле-

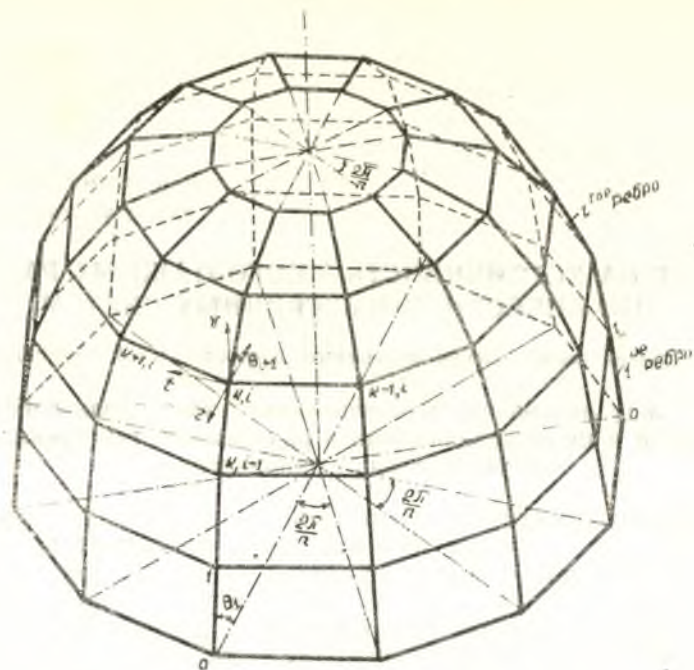


Рис. 1.

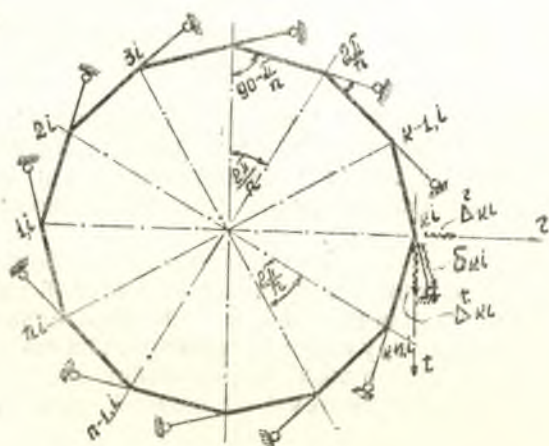


Рис. 2.

жащим элементам. А в самом i -том кольце из условий нулевых нагрузок видно, что работают только три названных элемента.

Таким образом, легко показать, что от приложения к узлу k, i силы 1 в горизонтальной плоскости по радиальному направлению (рис. 4) будут работать только добавочные связи узлов k, i и $k+1, i$, а также ригель, соединяющий эти узлы.

Обозначения видны на рисунках 2, 3а и 4а.

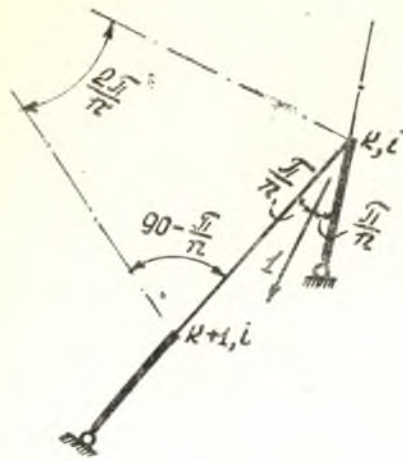


Рис. 3.

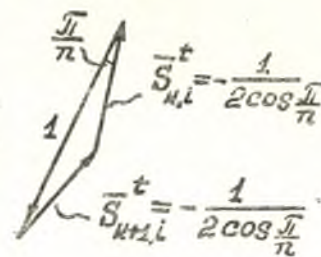


Рис. 3а.

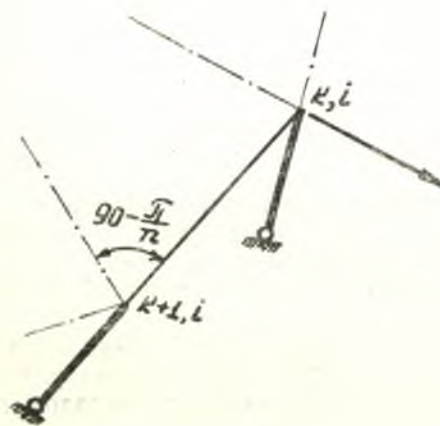


Рис. 4.

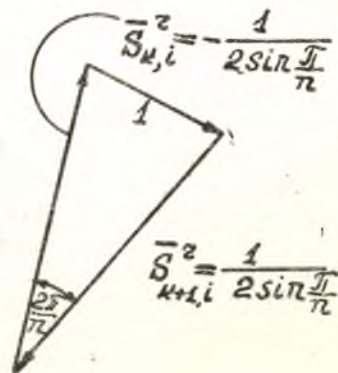


Рис. 4а.

$\delta_{1,i}, \delta_{2,i}, \dots, \delta_{k,i}$ — горизонтальные перемещения узлов $1, 2, \dots, k$ вдоль ригелей i -того этажа,

$\Delta_{1,i}^r, \dots, \Delta_{k,i}^r, \Delta_{1,i}^t, \dots, \Delta_{k,i}^t$ — горизонтальные перемещения тех же узлов в радиальном и тангенциальном направлениях,

$\bar{S}_{k,i}^r, \bar{S}_{k+1,i}^t$ — усилия в добавочных связях от единичных нагрузок.

Для определения зависимости между $\Delta_{k,i}^r, \Delta_{k+1,i}^t$ и $\delta_{k,i}$ напишем уравнения возможных перемещений. При этом заметим, что так как продольными деформациями стержней сооружения обычно пренебрегают, как величинами весьма малого порядка малости по сравнению с

перемещениями узлов, то в уравнения работ войдут усилия только добавочных закреплений:

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^t + \sum_{k=1}^n \bar{S}_{k,i}^t \delta_{k,i} = 0,$$

или

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^t - \delta_{k,i} \frac{1}{2 \cos \frac{\pi}{n}} - \delta_{k+1,i} \frac{1}{2 \cos \frac{\pi}{n}} = 0.$$

Откуда

$$\Delta_{k,i}^t = \frac{\delta_{k,i} + \delta_{k+1,i}}{2 \cos \frac{\pi}{n}}. \quad (1)$$

Для определения $\Delta_{k,i}^r$ можно написать (рис. 2, 3 и 3а):

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^r + \sum_{k=1}^n \bar{S}_{k,i}^r \delta_{k,i} = 0,$$

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^r - \frac{\delta_{k,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}} + \frac{\delta_{k+1,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}} = 0.$$

Откуда:

$$\Delta_{k,i}^r = \frac{\delta_{k,i} - \delta_{k+1,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}}. \quad (2)$$

Чтобы определить зависимости между вертикальными перемещениями узлов Δ^v и перемещениями вдоль добавочных связей δ , необходимо приложить к узлу k, i в вертикальном направлении силу 1 , найти усилия в работающих элементах от этой единичной силы и написать уравнение работ.

На рис. 5 наведены жирно элементы, работающие от вертикальной единичной силы. То, что от этой силы работают именно указанные элементы, а не другие, легко показать, пользуясь методом нулевых нагрузок.

Усилия в работающих элементах можно определить следующим образом. Сначала необходимо разложить силу 1 на три направления в пространстве — на направления добавочных связей узлов k, i , $k+1, i$ и направление ребра $k, i - k+1, i$ (рис. 6), откуда определится усилие в ребре, соединяющем узлы k, i и $k+1, i$. После чего необходимо усилие этого ребра разложить на последующие три направления — на направление ниженаходящегося ребра и направления добавочных связей узлов $k, i-1$ и $k+1, i-1$ (рис. 7). Таким же образом необходимо продлить процесс разложения сил до самого нижнего, т. е. до первого этажа.

На рис. 6 показаны три проекции узла k, i и разложение единичной силы 1 на указанные ранее три направления. Вначале находим равнодействующую R силы 1 , усилия в ребре $k, i - k+1, i$ (рис. 6а),

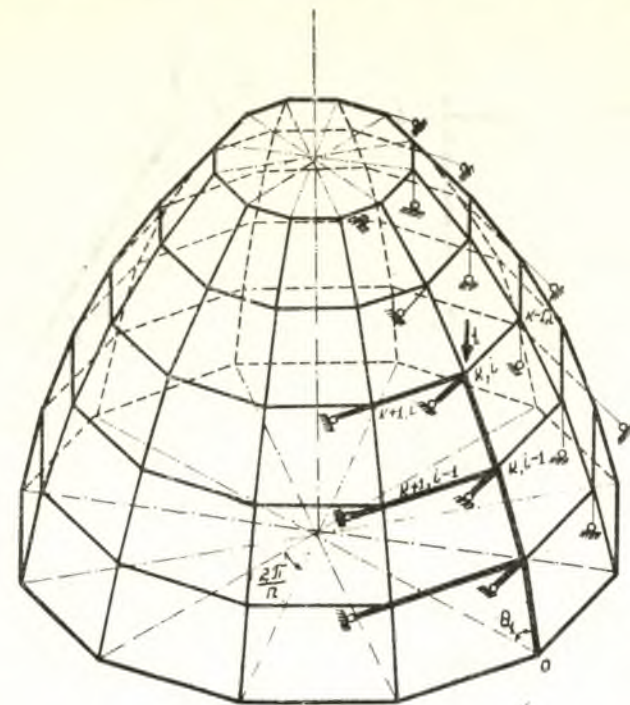


Рис. 5.

после чего, раскладывая силу R на направления добавочных связей узлов k, i и $k+1, i$ (рис. 6б), находим усилия в этих связях.

Усилие в ребре $k, i - k+1, i$ равно (рис. 6а):

$$N_{k,i} = - \frac{1}{\sin \theta_i}, \quad (3)$$

где θ_i — угол наклона к горизонту i -того ребра, соединяющем узлы k, i -того и $k+1, i$ -того колец.

Усилия в добавочных связях узлов k, i и $k+1, i$ будут:

$$S_{k,i} = \frac{R}{2 \sin \frac{\pi}{n}} = \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}},$$

$$S_{k+1,i} = - \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}}. \quad (4)$$

Усилие $N_{k,i}$ потечет в работающие элементы нижеследующих этажей. Разложение $N_{k,i}$ на направление ниженаходящегося ребра и направления добавочных связей узлов $k, i-1$ и $k+1, i-1$ показано на рис. 7. Поступаем так же, как и в предыдущем узле.

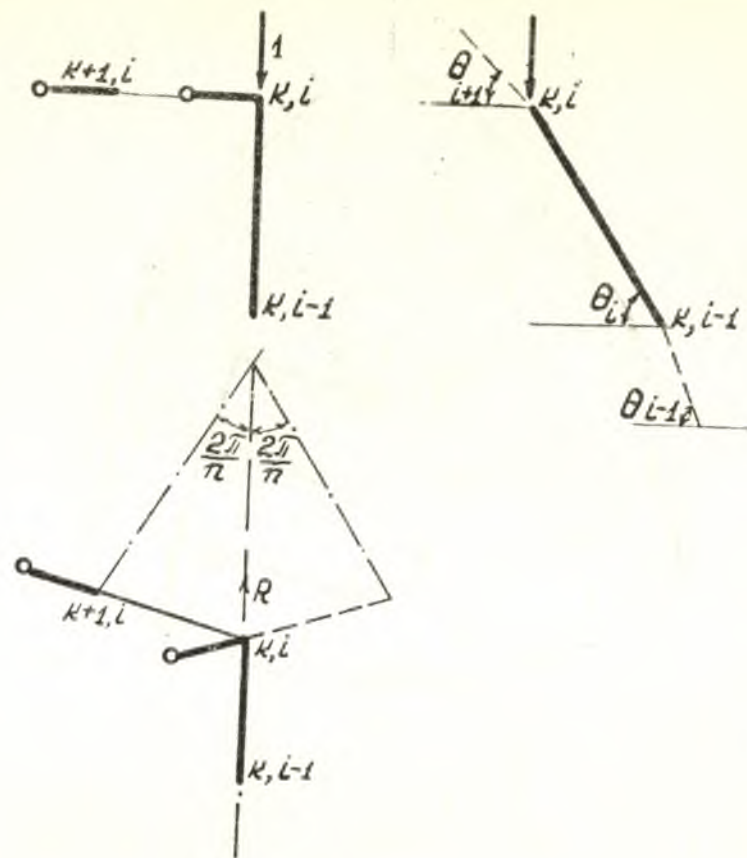


Рис. 6.

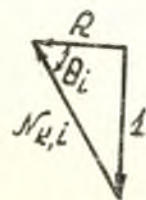


Рис. 6а.

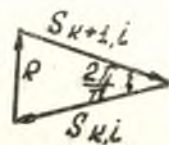


Рис. 6б.

Зная, что равнодействующая усилий двух соседних ребер находится (рис. 7а) в горизонтальной плоскости, легко определить усилие в ребре $k, i-1-k, i-2$ и величину равнодействующей R . После чего, раскладывая равнодействующую R (рис. 7б), находим усилия в добавочных связях узлов $k, i-1$ и $k+1, i-1$. Пользуясь теоремой синусов, получим (рис. 7а):

$$N_{k, i-1} = -\frac{1}{\sin \theta_{i-1}},$$

$$R = \frac{\sin(\theta_{i-1} - \theta_i)}{\sin \theta_{i-1} \sin \theta_i} \quad (5)$$

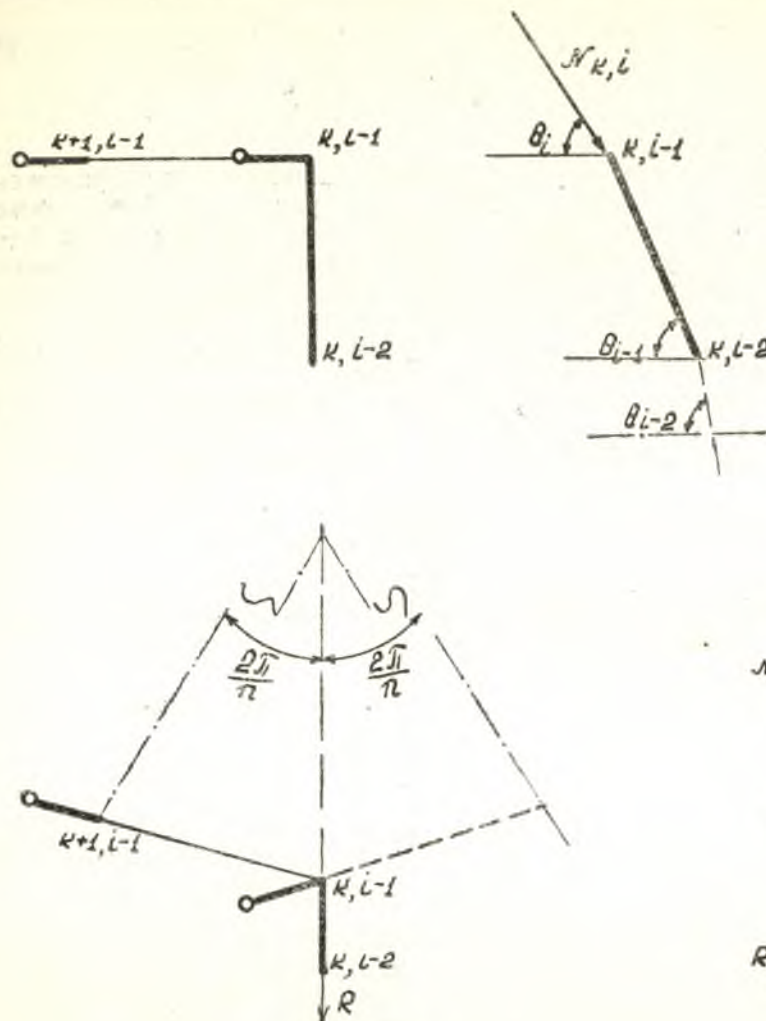


Рис. 7.

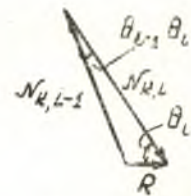


Рис. 7а.

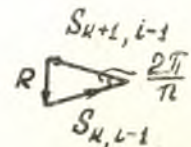


Рис. 7б.

По рисунку 7б видно, что:

$$S_{k, i-1} = -\frac{R}{2 \sin \frac{\pi}{n}} = -\frac{\sin(\theta_{i-1} - \theta_i)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{i-1} \sin \theta_i},$$

$$S_{k+1, i-1} = \frac{\sin(\theta_{i-1} - \theta_i)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{i-1} \sin \theta_i} \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) можно сделать вывод, что в общем виде усилия в работающих элементах этажей, находящихся ниже i -того, от приложения к узлу k, i вертикальной единичной силы будут:

$$N_{k, j} = -\frac{1}{\sin \theta_j} \quad (j=1, 2, \dots, i-1)$$

$$S_{k,j} = -S_{k+1,j} = -\frac{\sin(\theta_{j-1} - \theta_j)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{j-1} \sin \theta_j}, \quad (7)$$

где j — номер этажа (кольца).

Из (7) видно, что от вертикальной единичной силы, приложенной к узлу k , i -того этажа, добавочные стержни узлов k всех нижеследующих этажей будут сжаты, а добавочные стержни узлов $k+1$ тех же этажей будут растянуты. Усилия же в добавочных стержнях узлов k и $k+1$ одного и того же этажа равны между собой по абсолютной величине. Ребра от данной единичной силы всегда будут сжаты, а усилия в них равны обратным величинам синусов углов наклона соответствующих ребер к горизонту.

Для установления зависимости между вертикальным смещением k , i -того узла $\Delta_{k,i}^v$ и смещениями узлов δ вдоль добавочных стержней напишем уравнение принципа возможных перемещений:

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^v + S_{k,i} \cdot \delta_{k,i} + S_{k+1,i} \cdot \delta_{k+1,i} + \sum_{j=1}^{i-1} (S_{k,j} \cdot \delta_{k,j} + S_{k+1,j} \cdot \delta_{k+1,j}) = 0.$$

Подставив в это уравнение значения $S_{k,i}$, $S_{k+1,i}$ и $S_{k,j}$ из (4) и (7), получим:

$$1 \cdot \Delta_{k,i}^v + S_{k,i} (\delta_{k,i} - \delta_{k+1,i}) + \sum_{j=1}^{i-1} S_{k,j} (\delta_{k,j} - \delta_{k+1,j}) = 0.$$

Откуда:

$$\Delta_{k,i}^v = \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}} (\delta_{k+1,i} - \delta_{k,i}) + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\sin(\theta_{j-1} - \theta_j)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{j-1} \sin \theta_j} (\delta_{k,j} - \delta_{k+1,j}). \quad (8)$$

Формулы (1), (2) и (8) дают зависимость между перемещениями вдоль дополнительных стержней и радиальными, тангенциальными и вертикальными перемещениями k -того узла i -того этажа.

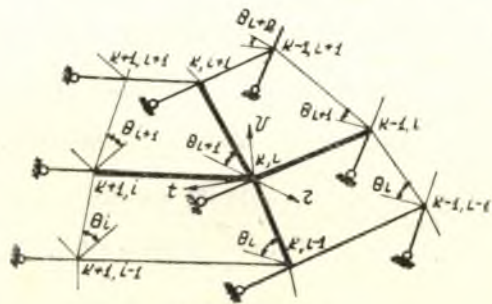


Рис. 8.

Составим выражения типа (1), (2) и (8) для трех соседних узлов (рис. 8) i -того этажа:

$$\Delta_{k-1,i}^r = \frac{\delta_{k-1,i} - \delta_{k,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (9)$$

$$\Delta_{k-1,i}^t = \frac{\delta_{k-1,i} + \delta_{k,i}}{2 \cos \frac{\pi}{n}},$$

$$\Delta_{k-1,i}^v = \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}} (\delta_{k,i} - \delta_{k-1,i}) + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\sin(\theta_{j-1} - \theta_j)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{j-1} \sin \theta_j} (\delta_{k-1,j} - \delta_{k,j}).$$

$$\Delta_{k,i}^r = \frac{\delta_{k,i} - \delta_{k+1,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}},$$

$$\Delta_{k,i}^t = \frac{\delta_{k,i} + \delta_{k+1,i}}{2 \cos \frac{\pi}{n}},$$

$$\Delta_{k,i}^v = \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}} (\delta_{k+1,i} - \delta_{k,i}) + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\sin(\theta_{j-1} - \theta_j)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{j-1} \sin \theta_j} (\delta_{k,j} - \delta_{k+1,j}).$$

$$\Delta_{k+1,i}^r = \frac{\delta_{k+1,i} - \delta_{k+2,i}}{2 \sin \frac{\pi}{n}},$$

$$\Delta_{k+1,i}^t = \frac{\delta_{k+1,i} + \delta_{k+2,i}}{2 \cos \frac{\pi}{n}},$$

$$\Delta_{k+1,i}^v = \frac{\text{ctg } \theta_i}{2 \sin \frac{\pi}{n}} (\delta_{k+2,i} - \delta_{k+1,i}) + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\sin(\theta_{j-1} - \theta_j)}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{j-1} \sin \theta_j} (\delta_{k+1,j} - \delta_{k+2,j}).$$

Для составления уравнений равновесия k , i -того узла нам еще необходимо иметь формулы, аналогичные (9—11) для $i+1$ -го, $i-1$ -го и др. этажей. Написать их можно, меняя в (9—11) соответствующие индексы.

Зависимость между основными неизвестными и их составляющими вдоль и перпендикулярно стержням, сходящимся в k , i -том узле

При исследовании устойчивости одноэтажных систем нами были выведены формулы, выражающие изгибающие моменты $M_{1,2}$ и перерезывающие силы $Q_{1,2}$ по концам (в сечениях 1 и 2) центрально-сжатого стержня пространственной рамы. Для случая плоской потери устойчивости, или вернее, для проекции деформируемой оси стержня на одну из координатных плоскостей эти формулы [1] имеют вид:

$$\begin{aligned} M_{1,2} &= 2b_{1,2} [\alpha_{1,2} \varphi_1 + \beta_{1,2} \varphi_2 - (\alpha + \beta)_{1,2} \psi_{1,2}], \\ Q_{1,2} &= -\frac{2b_{1,2}}{l_{1,2}} [(\alpha + \beta)_{1,2} (\varphi_1 + \varphi_2) - \gamma_{1,2} \psi_{1,2}]. \end{aligned} \quad (12)$$

где:

$\alpha_{1,2}$, $\beta_{1,2}$ и $\gamma_{1,2}$ — специальные функции, для которых составлены таблицы [1],

φ_1 и φ_2 — углы поворота концов стержня, а $\psi_{1,2}$ — угол „перекоса“ стержня,

$b_{1,2}$ — погонная жесткость стержня $\left(\frac{EI_{1,2}}{l_{1,2}}\right)$.

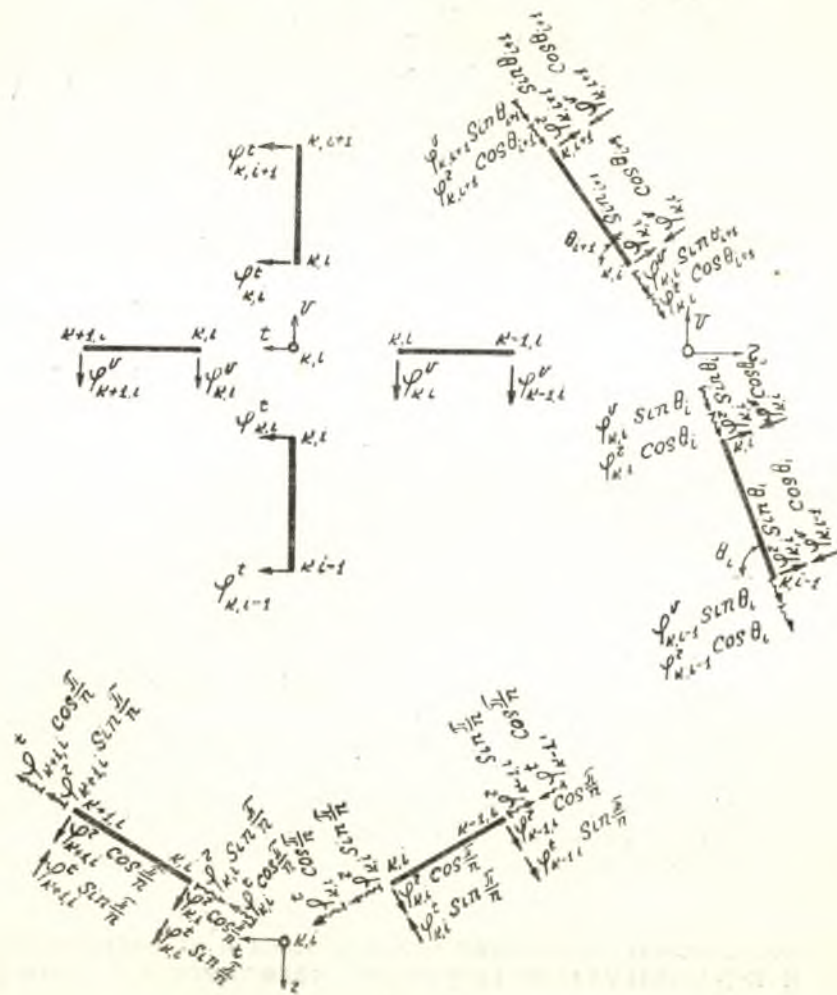


Рис. 9.

Для использования формул (12) в нашей задаче необходимо перемещения Δ^r , Δ^t , Δ^v k , i -того и соседних к нему узлов, а также моменты и перерезывающие силы, появившиеся в этих узлах в момент потери устойчивости, представить в виде векторов и разложить их на составляющие, направленные вдоль и перпендикулярно стержням, сходящимся в этих узлах.

На рисунке 9 изображены три проекции стержней, сходящихся в k , i -том узле, и приложенные к концам этих стержней составляю-

щие перемещений Δ^r , Δ^t и Δ^v . Составляющие векторов показаны в соответствующих плоскостях проекции. Множители возле составляющих векторов (единицы, \cos или \sin) взяты из вспомогательных рисунков 10—12, где показаны проекции радиальных, тангенциальных и вертикальных единичных векторов, приложенных к k , i -тому узлу. Аналогично на рис. 13 показаны составляющие векторов φ^r , φ^t и φ^v , приложенных к концам стержней, сходящихся в k , i -том узле.

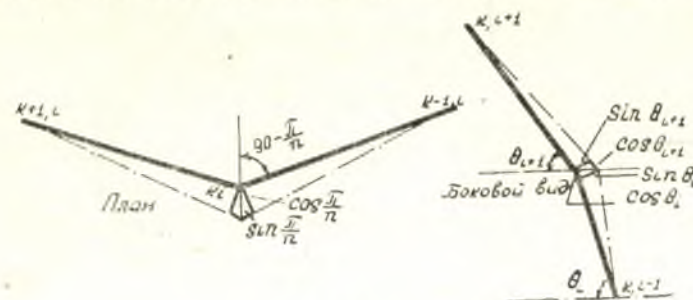


Рис. 10.

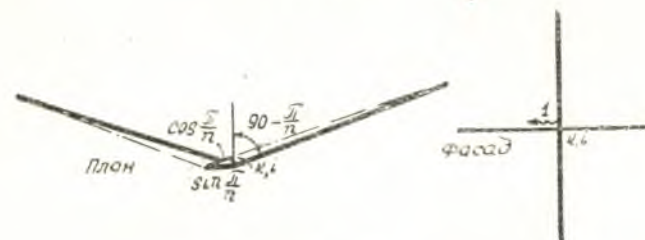


Рис. 11.

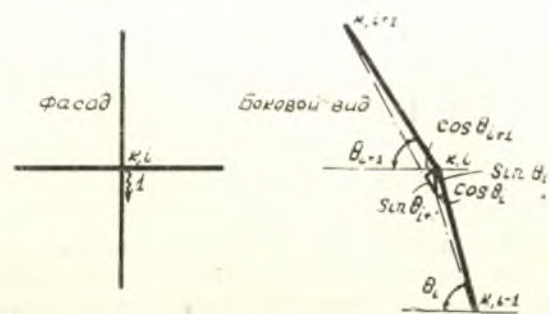


Рис. 12.

Для того, чтобы составить для стержней, сходящихся в k , i -том узле, формулы, аналогичные (12), необходимо мысленно принять на концах k , i этих стержней начало координат и написать значения углов поворотов и взаимных сдвигов концов этих стержней. При составлении выражений, аналогичных (12), будем пользоваться принципом независимости действия сил, т. е. алгебраически суммировать одноименные деформации или усилия, вызванные от загрузки каждого из узлов в отдельности.

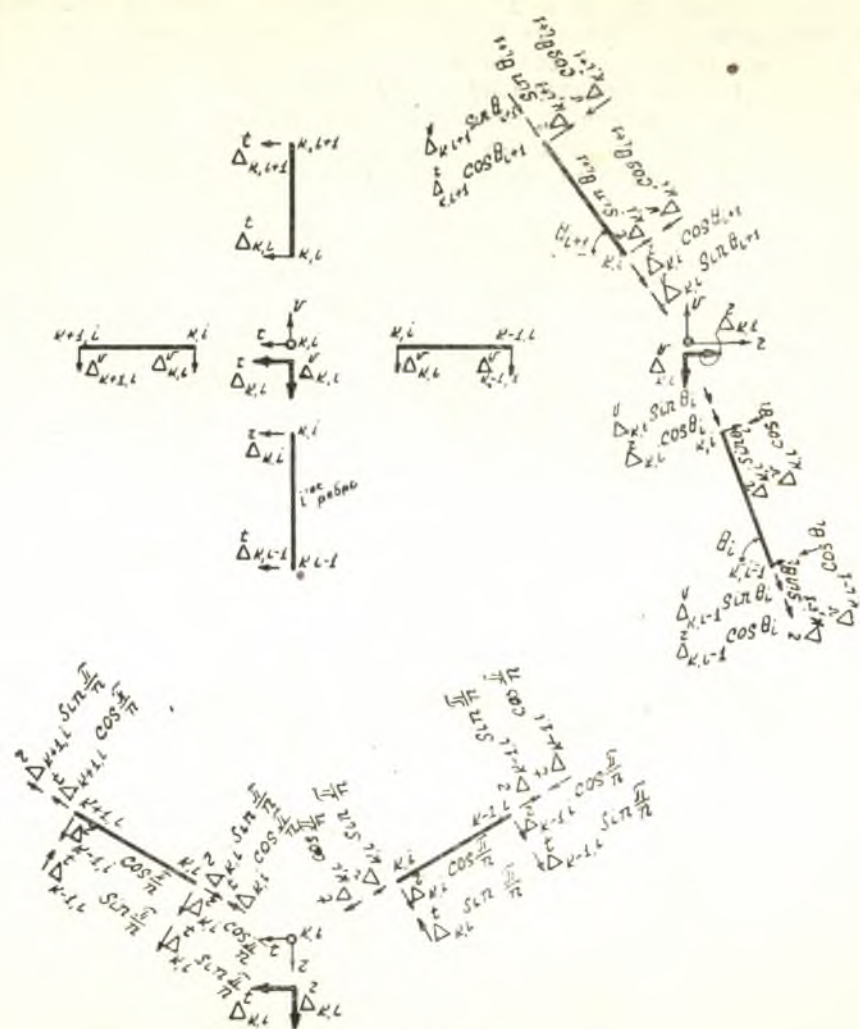


Рис. 13.

В нашем случае можно пользоваться принципом наложения сил и деформаций, ибо система геометрически неизменяема, а ее деформации ничтожно малы по сравнению с размерами самого сооружения.

Заметим также, что при составлении уравнений статики в общем виде для k, i -того узла не будем делать различия (из-за ничтожно малых величин деформаций) между формой ненагруженного и нагруженного сооружения — между схемой до и в момент потери устойчивости.

Для большей ясности при составлении выражений изгибающих моментов, крутящих моментов и перерезывающих сил по концам стержней k, i -того узла (рис. 8—13) покажем каждый из этих стержней в отдельности (рис. 14—17). Возле рисунков 14—17 даны выражения для моментов и перерезывающих сил, для дополнительных

обозначений деформаций, а также показаны для ориентации координатные оси r, t, v , используемые в дальнейшем для составления уравнений равновесия k, i -того узла.

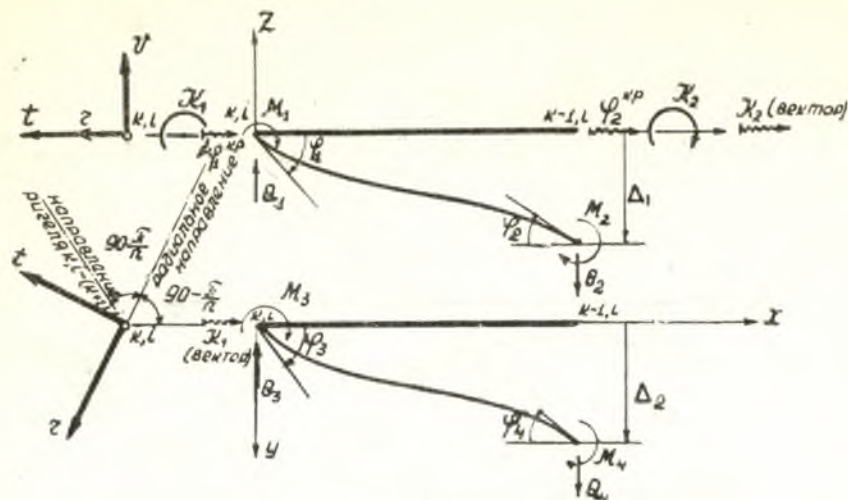


Рис. 14.

$$\begin{aligned}
 M_1 &= 2b_i^r \left[\alpha_i^r \varphi_1 + \beta_i^r \varphi_2 - (\alpha + \beta)_i^r \frac{\Delta_1}{l_i} \right], \\
 M_2 &= 2b_i^r \left[\alpha_i^r \varphi_2 + \beta_i^r \varphi_1 - (\alpha + \beta)_i^r \frac{\Delta_1}{l_i} \right], \\
 Q_1 = Q_2 &= -\frac{2b_i^r}{l_i} \left[(\alpha + \beta)_i^r (\varphi_1 + \varphi_2) - \gamma_i^r \frac{\Delta_1}{l_i} \right], \\
 M_3 &= 2b_i^v \left[\alpha_i^v \varphi_3 + \beta_i^v \varphi_4 - (\alpha + \beta)_i^v \frac{\Delta_2}{l_i} \right], \\
 M_4 &= 2b_i^v \left[\alpha_i^v \varphi_4 + \beta_i^v \varphi_3 - (\alpha + \beta)_i^v \frac{\Delta_2}{l_i} \right], \\
 Q_3 = Q_4 &= -\frac{2b_i^v}{l_i} \left[(\alpha + \beta)_i^v (\varphi_3 + \varphi_4) - \gamma_i^v \frac{\Delta_2}{l_i} \right], \\
 K_1 = -K_2 &= b_i^{kp} [\varphi_1^{kp} - \varphi_2^{kp}],
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= \varphi_{k,i}^r \cos \frac{\pi}{n} - \varphi_{k,i}^t \sin \frac{\pi}{n}, \\
 \varphi_2 &= \varphi_{k-1,i}^r \cos \frac{\pi}{n} + \varphi_{k-1,i}^t \sin \frac{\pi}{n}, \\
 \varphi_3 &= -\varphi_{k,i}^v, \\
 \varphi_4 &= -\varphi_{k-1,i}^v,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \varphi_1^{kp} &= -\varphi_{k,i}^r \sin \frac{\pi}{n} - \varphi_{k,i}^t \cos \frac{\pi}{n}, \\ \varphi_2^{kp} &= \varphi_{k-1,i}^r \sin \frac{\pi}{n} - \varphi_{k-1,i}^t \cos \frac{\pi}{n}, \\ \Delta_1 &= \Delta_{k-1,i}^v - \Delta_{k,i}^v, \\ \Delta_2 &= \Delta_{k,i}^t \sin \frac{\pi}{n} - \Delta_{k,i}^r \cos \frac{\pi}{n} + \Delta_{k-1,i}^t \sin \frac{\pi}{n} + \Delta_{k-1,i}^r \cos \frac{\pi}{n}. \end{aligned}$$

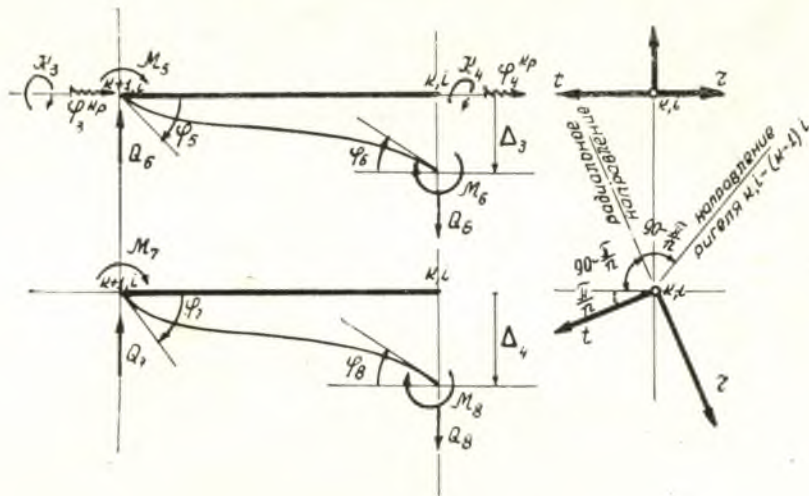


Рис. 15.

$$\begin{aligned} M_5 &= 2b_i^r \left[\alpha_i^r \varphi_5 + \beta_i^r \varphi_6 - (\alpha + \beta)_i^r \frac{\Delta_3}{l_i} \right], \\ M_6 &= 2b_i^r \left[\alpha_i^r \varphi_6 + \beta_i^r \varphi_5 - (\alpha + \beta)_i^r \frac{\Delta_3}{l_i} \right], \\ Q_5 = Q_6 &= -\frac{2b_i^r}{l_i} \left[(\alpha + \beta)_i^r (\varphi_5 + \varphi_6) - \gamma_i^r \frac{\Delta_3}{l_i} \right], \\ M_7 &= 2b_i^v \left[\alpha_i^v \varphi_7 + \beta_i^v \varphi_8 - (\alpha + \beta)_i^v \frac{\Delta_4}{l_i} \right], \\ M_8 &= 2b_i^v \left[\alpha_i^v \varphi_8 + \beta_i^v \varphi_7 - (\alpha + \beta)_i^v \frac{\Delta_4}{l_i} \right], \\ Q_7 = Q_8 &= -\frac{2b_i^v}{l_i} \left[(\alpha + \beta)_i^v (\varphi_7 + \varphi_8) - \gamma_i^v \frac{\Delta_4}{l_i} \right], \end{aligned} \tag{15}$$

где:

$$\varphi_5 = \varphi_{k+1,i}^r \cos \frac{\pi}{n} - \varphi_{k+1,i}^t \sin \frac{\pi}{n},$$

$$\begin{aligned} \varphi_6 &= \varphi_{k,i}^r \cos \frac{\pi}{n} + \varphi_{k,i}^t \sin \frac{\pi}{n}, \\ \varphi_7 &= -\varphi_{k+1,i}^v, \\ \varphi_8 &= -\varphi_{k,i}^v, \\ \varphi_3^{kp} &= -\varphi_{k+1,i}^t \cos \frac{\pi}{n} - \varphi_{k+1,i}^r \sin \frac{\pi}{n}, \\ \varphi_4^{kp} &= \varphi_{k,i}^r \sin \frac{\pi}{n} - \varphi_{k,i}^t \cos \frac{\pi}{n}, \\ \Delta_3 &= \Delta_{k,i}^v - \Delta_{k+1,i}^v, \\ \Delta_4 &= \Delta_{k,i}^r \cos \frac{\pi}{n} + \Delta_{k,i}^t \sin \frac{\pi}{n} + \Delta_{k+1,i}^r \cos \frac{\pi}{n} - \Delta_{k+1,i}^t \sin \frac{\pi}{n}. \end{aligned} \tag{16}$$

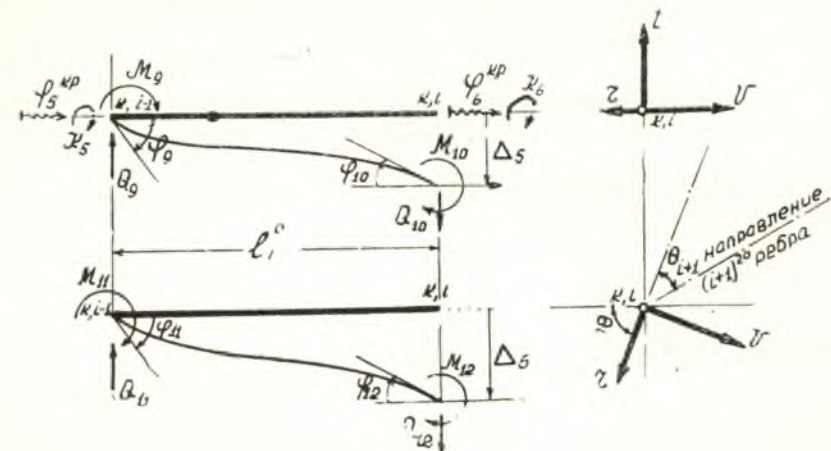


Рис. 16.

$$\begin{aligned} M_9 &= 2b_i^{e,r} \left[\alpha_i^{e,r} \varphi_9 + \beta_i^{e,r} \varphi_{10} - (\alpha + \beta)_i^{e,r} \frac{\Delta_5}{l_i^c} \right], \\ M_{10} &= 2b_i^{e,r} \left[\alpha_i^{e,r} \varphi_{10} + \beta_i^{e,r} \varphi_9 - (\alpha + \beta)_i^{e,r} \frac{\Delta_5}{l_i^c} \right], \\ Q_9 = Q_{10} &= -\frac{2b_i^{e,r}}{l_i^c} \left[(\alpha + \beta)_i^{e,r} (\varphi_9 + \varphi_{10}) - \gamma_i^{e,r} \frac{\Delta_5}{l_i^c} \right], \\ M_{11} &= 2b_i^{e,t} \left[\alpha_i^{e,t} \varphi_{11} + \beta_i^{e,t} \varphi_{12} - (\alpha + \beta)_i^{e,t} \frac{\Delta_6}{l_i^c} \right], \\ M_{12} &= 2b_i^{e,t} \left[\alpha_i^{e,t} \varphi_{12} + \beta_i^{e,t} \varphi_{11} - (\alpha + \beta)_i^{e,t} \frac{\Delta_6}{l_i^c} \right], \\ Q_{11} = Q_{12} &= -\frac{2b_i^{e,t}}{l_i^c} \left[(\alpha + \beta)_i^{e,t} (\varphi_{11} + \varphi_{12}) - \gamma_i^{e,t} \frac{\Delta_6}{l_i^c} \right], \\ K_5 = -K_6 &= b_i^{e,t} [\varphi_5^{kp} - \varphi_6^{kp}], \end{aligned} \tag{17}$$

где:

$$\begin{aligned}
 \varphi_9 &= \varphi_{k, i-1}^r \sin \theta_i - \varphi_{k, i-1}^v \cos \theta_i, \\
 \varphi_{10} &= \varphi_{k, i}^r \sin \theta_i - \varphi_{k, i}^v \cos \theta_i, \\
 \varphi_{11} &= \varphi_{k, i-1}^t, \\
 \varphi_{12} &= \varphi_{k, i}^t, \\
 \varphi_5^{kp} &= -\varphi_{k, i-1}^r \cos \theta_i - \varphi_{k, i-1}^v \sin \theta_i, \\
 \varphi_6^{kp} &= -\varphi_{k, i}^r \cos \theta_i - \varphi_{k, i}^v \sin \theta_i, \\
 \Delta_5 &= \Delta_{k, i-1}^t - \Delta_{k, i}^t, \\
 \Delta_6 &= \Delta_{k, i-1}^v \cos \theta_i - \Delta_{k, i-1}^r \sin \theta_i + \Delta_{k, i}^r \sin \theta_i - \Delta_{k, i}^v \cos \theta_i,
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

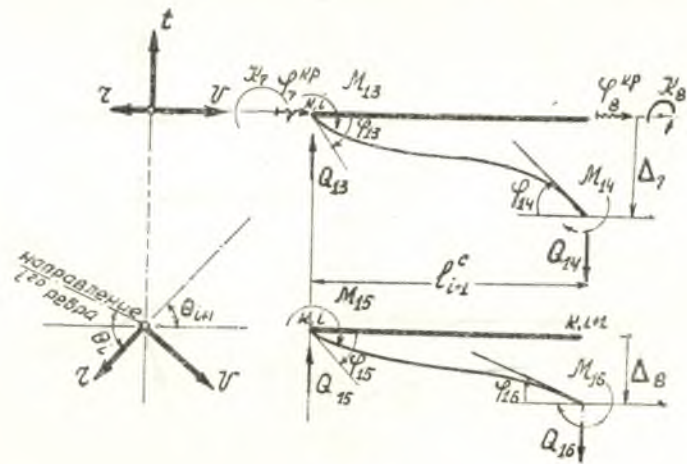


Рис. 17.

$$\begin{aligned}
 M_{13} &= 2b_{i+1}^{or} \left[\alpha_{i+1}^{or} \varphi_{13} + \beta_{i+1}^{or} \varphi_{14} - (\alpha + \beta)_{i+1}^{or} \frac{\Delta_7}{l_{i+1}^o} \right], \\
 M_{14} &= 2b_{i+1}^{or} \left[\alpha_{i+1}^{or} \varphi_{14} + \beta_{i+1}^{or} \varphi_{13} - (\alpha + \beta)_{i+1}^{or} \frac{\Delta_7}{l_{i+1}^o} \right], \\
 Q_{13} = Q_{14} &= -\frac{2b_{i+1}^{or}}{l_{i+1}^o} \left[(\alpha + \beta)_{i+1}^{or} (\varphi_{13} + \varphi_{14}) - \gamma_{i+1}^{or} \frac{\Delta_7}{l_{i+1}^o} \right], \\
 M_{15} &= 2b_{i+1}^{ot} \left[\alpha_{i+1}^{ot} \varphi_{15} + \beta_{i+1}^{ot} \varphi_{16} - (\alpha + \beta)_{i+1}^{ot} \frac{\Delta_8}{l_{i+1}^o} \right], \\
 M_{16} &= 2b_{i+1}^{ot} \left[\alpha_{i+1}^{ot} \varphi_{16} + \beta_{i+1}^{ot} \varphi_{15} - (\alpha + \beta)_{i+1}^{ot} \frac{\Delta_8}{l_{i+1}^o} \right], \\
 Q_{15} = Q_{16} &= -\frac{2b_{i+1}^{ot}}{l_{i+1}^o} \left[(\alpha + \beta)_{i+1}^{ot} (\varphi_{15} + \varphi_{16}) - \gamma_{i+1}^{ot} \frac{\Delta_8}{l_{i+1}^o} \right], \\
 K_7 = -K_8 &= b_{i+1}^{kp} [\varphi_7^{kp} - \varphi_8^{kp}],
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{13} &= \varphi_{k, i}^r \sin \theta_{i+1} - \varphi_{k, i}^v \cos \theta_{i+1}, \\
 \varphi_{14} &= \varphi_{k, i+1}^r \sin \theta_{i+1} - \varphi_{k, i+1}^v \cos \theta_{i+1}, \\
 \varphi_{15} &= \varphi_{k, i}^t, \\
 \varphi_{16} &= \varphi_{k, i+1}^t, \\
 \varphi_7^{kp} &= -(\varphi_{k, i}^r \cos \theta_{i+1} + \varphi_{k, i}^v \sin \theta_{i+1}), \\
 \varphi_8^{kp} &= -(\varphi_{k, i+1}^r \cos \theta_{i+1} + \varphi_{k, i+1}^v \sin \theta_{i+1}), \\
 \Delta_7 &= \Delta_{k, i}^t - \Delta_{k, i+1}^t, \\
 \Delta_8 &= \Delta_{k, i}^v \cos \theta_{i+1} - \Delta_{k, i}^r \sin \theta_{i+1} + \Delta_{k, i+1}^r \sin \theta_{i+1} - \Delta_{k, i+1}^v \cos \theta_{i+1}.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Принятые обозначения для погонных жесткостей, специальных функций для ригелей и ребер следующие:

для ригелей

b_i^r — погонная жесткость каждого из ригелей i -того этажа относительно горизонтальной главной центральной оси поперечного сечения ригеля,

b_i^v — погонная жесткость каждого из ригелей i -того этажа относительно главной центральной оси поперечного сечения ригеля, направленной вертикально,

b_i^{kp} — погонная жесткость каждого из ригелей i -того этажа на кручение,

$\alpha_i^r, \beta_i^r, \alpha_i^v, \alpha_i^t$ и т.д. — соответствующие значения специальных функций [1],
 l_i — длина ригеля i -того этажа;

для ребер

b_i^{or} — погонная жесткость каждого ребра i -того этажа относительно главной центральной оси поперечного сечения ребра, лежащей в радиальной плоскости. Индекс o указывает, что речь идет о стойке или ребре,

b_i^{ot} — погонная жесткость каждого ребра относительно второй главной центральной оси его поперечного сечения (параллельной оси t),

$b_i^{c, kp}$ — погонная жесткость ребра i -того этажа на кручение,

l_i^o — длина ребра i -того этажа.

Составление трех уравнений равновесия векторов моментов k, i -того узла

На рис. 18 показаны три проекции k, i -того узла и реактивные усилия — изгибающие и крутящие моменты в виде векторов, перерезывающие и нормальные силы, с их приращениями, появившиеся в узле в момент критического состояния. Реактивные силы показаны в обратном направлении по сравнению с реактивными силами, действующими на концы k, i (рис. 14–17) стержней, сходящихся в этом узле.

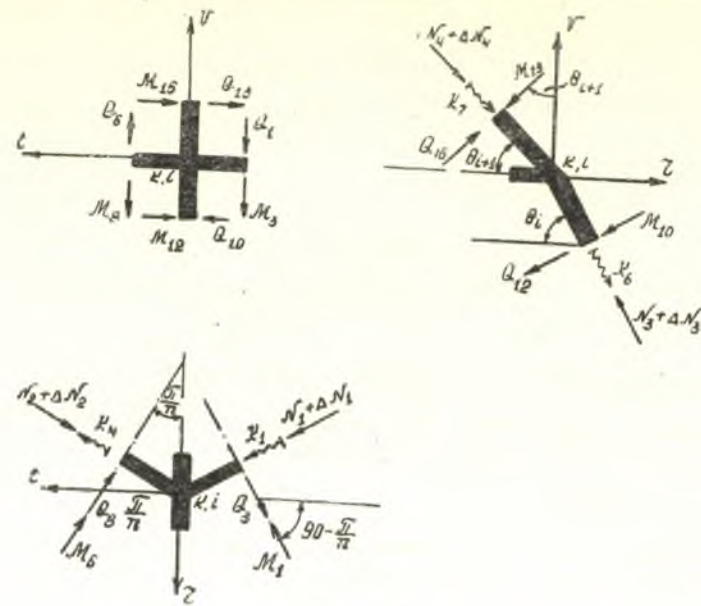


Рис. 18.

До составления уравнений удобно предварительно составить таблицу 1 значений косинусов углов, образованных векторами моментов с осями координат r, t, v . Косинусы углов, образованных нормальными и перерезывающими силами с осями координат, не вошли в таблицу 1, ибо они не входят в уравнения равновесия векторов моментов.

Таблица 1

Вектор Ось	M_3	M_{12}	M_8	M_{15}	M_1	M_6	M_{13}	M_{10}
r	0	0	0	0	$-\cos \frac{\pi}{n}$	$-\cos \frac{\pi}{n}$	$-\sin \theta_{i+1}$	$-\sin \theta_i$
t	0	-1	0	-1	$\sin \frac{\pi}{n}$	$-\sin \frac{\pi}{n}$	0	0
v	-1	0	-1	0	0	0	$-\cos \theta_{i+1}$	$-\cos \theta_i$

Продолж. таблицы 1

Вектор Ось	K_1	K_4	K_6	K_7
r	$\sin \frac{\pi}{n}$	$-\sin \frac{\pi}{n}$	$\cos \theta_i$	$\cos \theta_{i+1}$
t	$\cos \frac{\pi}{n}$	$\cos \frac{\pi}{n}$	0	0
v	0	0	$-\sin \theta_i$	$-\sin \theta_{i+1}$

При помощи таблицы 1 легко написать три уравнения, выражающие собой равенство нулю суммы моментов всех реактивных сил k, i -го узла в момент потери устойчивости относительно трех координатных осей r, t, v (рис. 18 и таблица 1):

$$I. \Sigma M_r = 0.$$

$$-(M_1 + M_6) \cos \frac{\pi}{n} - M_{13} \sin \theta_{i+1} - M_{10} \sin \theta_i + (K_1 - K_4) \sin \frac{\pi}{n} + K_6 \cos \theta_i + K_7 \cos \theta_{i+1} = 0, \quad (21)$$

$$II. \Sigma M_t = 0.$$

$$-M_{12} - M_{15} + (M_1 - M_6) \sin \frac{\pi}{n} + (K_1 + K_4) \cos \frac{\pi}{n} = 0, \quad (22)$$

$$III. \Sigma M_v = 0.$$

$$-M_3 - M_8 - M_{13} \cos \theta_{i+1} - M_{10} \cos \theta_i - K_6 \sin \theta_i - K_7 \sin \theta_{i+1} = 0. \quad (23)$$

В уравнения (21—23) необходимо подставить значения моментов в функции от основных неизвестных $\varphi_{k,i}^r, \varphi_{k,i}^t, \varphi_{k,i}^v, \dots, \delta_{k,i}$ при помощи выражений (13—20), сделать преобразования и выделить коэффициенты при радиальных, тангенциальных и вертикальных углах поворота узлов, при линейных смещениях вдоль добавочных стержней и тогда получим в окончательном и в общем виде три уравнения равновесия k, i -го узла (24—26).

$$K_i^I \varphi_{k,i}^r + A_i^I (\varphi_{k-1,i}^r + \varphi_{k+1,i}^r) + \Gamma_i^I \varphi_{k,i}^r + K_{i+1}^I \varphi_{k,i+1}^r + B_i^{II} (\varphi_{k-1,i}^t - \varphi_{k+1,i}^t) + E_i^{II} \varphi_{k,i-1}^v + E^{III} \varphi_{k,i}^v + E_{i+1}^I \varphi_{k,i+1}^v + \sum_{j=1}^{i-2} M_{i,j}^I (-\delta_{k-1,j} + \delta_{k,j} + \delta_{k+1,j} - \delta_{k+2,j}) + D_i^I (\delta_{k-1,i-1} + \delta_{k+2,i-1}) + B_i^I (\delta_{k,i-1} + \delta_{k+1,i-1}) + B_i^{II} (\delta_{k-1,i} + \delta_{k+2,i}) + B_i^{IV} (\delta_{k,i} + \delta_{k+1,i}) + D_{i+1}^{II} (\delta_{k,i+1} + \delta_{k+1,i+1}) = 0; \quad (24)$$

$$B_i^{II} (-\varphi_{k-1,i}^r + \varphi_{k+1,i}^r) + K_i^{II} \varphi_{k,i-1}^t + A_i^{II} (\varphi_{k-1,i}^t + \varphi_{k+1,i}^t) + \Gamma_i^{II} \varphi_{k,i}^t + K_{i+1}^{II} \varphi_{k,i+1}^t + \sum_{j=1}^{i-2} M_{i,j}^{II} (\delta_{k-1,j} - \delta_{k+2,j}) + \sum_{j=1}^{i-2} M_{i,j}^{III} (\delta_{k,j} - \delta_{k+1,j}) + B_i^{III} (\delta_{k-1,i-1} - \delta_{k+2,i-1}) + E_i^{II} (\delta_{k,i-1} - \delta_{k+1,i-1}) + B_i^{IV} (\delta_{k-1,i} - \delta_{k+2,i}) + E_i^{IV} (\delta_{k,i} - \delta_{k+1,i}) + D_{i+1}^{III} (\delta_{k,i+1} - \delta_{k+1,i+1}) = 0; \quad (25)$$

$$E_i^I \varphi_{k,i-1}^v + E_i^{III} \varphi_{k,i}^v + E_{i+1}^I \varphi_{k,i+1}^v + K_i^{III} \varphi_{k,i-1}^v + A_i^{III} (\varphi_{k-1,i}^v + \varphi_{k+1,i}^v) + I_i^{III} \varphi_{k,i}^v + K_{i+1}^{III} \varphi_{k,i+1}^v + B_i^{III} (\delta_{k,i-1} + \delta_{k+1,i-1}) + D_{i+1}^{IV} (\delta_{k-1,i} + \delta_{k+2,i}) + B_i^{IV} (\delta_{k,i} + \delta_{k+1,i}) - E_{i+1}^{III} (\delta_{k,i+1} + \delta_{k+1,i+1}) = 0. \quad (26)$$

Эти уравнения (24—26) приведены в форме сокращенной записи. Коэффициенты A, B, V, \dots при неизвестных являются функциями геометрических характеристик и упругих свойств элементов системы. Их значения приведены на стр. 221—227, где собраны окончательные данные для расчета.

Составление четвертого уравнения равновесия k, i -того узла

Для составления четвертого уравнения — уравнения равновесия векторов сил, действующих на какую-то выделенную часть системы, нам еще необходимо иметь выражения для четвертого вида реактивных сил в момент потери устойчивости. Такими реактивными силами являются приращения нормальных сил $\Delta N_1, \Delta N_2, \dots$ (рис. 18), появляющиеся в узлах в момент критического состояния.

На рис. 19 показаны лишь перерезывающие силы и приращения нормальных сил, действующих на узел k, i . Для определения выражений $\Delta N_1, \Delta N_2, \dots$ будем пользоваться уравнениями проекции векторов сил на определенные оси, а так как реактивные моменты не войдут в эти уравнения, то они и не приведены на рис. 19.

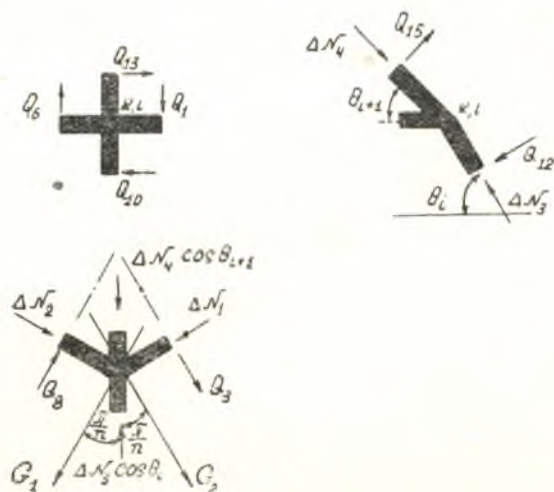


Рис. 19

Что же касается внешней нагрузки, нормальных сил в ригелях и ребрах, то их можно не вводить в уравнения, выражающие собой равенство нулю суммы проекций на любую ось всех реактивных сил, действующих на узел или какую-нибудь выделенную часть системы. Действительно, до потери устойчивости в узлах отсутствуют силовые факторы M, K, Q и ΔN , на узлы действуют лишь осевые силы N , которые вместе с внешней нагрузкой уравнивают систему, т. е. сумма их проекций на любую ось равна нулю и они не окажут влияния на условия, определяющие величины ΔN в функции от Q . Это весьма важное свойство, так как внешняя нагрузка и силы N нам весьма важны. Заметим также, что усилия в добавочных стержнях (см. основную систему на рис. 2, 5) равны нулю.

Для определения величин $\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3$ и ΔN_4 в функции от Q

необходимо составить четыре независимых уравнения, но из условия равновесия реактивных сил k, i -того узла (рис. 19) можно составить не более трех независимых уравнений. Таким образом, придется рассмотреть дополнительные условия.

По рис. 19 составим лишь два уравнения — суммы проекций всех сил на оси G_1 и G_2 , для чего предварительно составим таблицу значений косинусов углов между этими осями и реактивными силами k, i -того узла (таблица 2).

Таблица 2

Вектор Ось	Q_1	Q_4	Q_{10}	Q_{13}	Q_3	Q_8	Q_{12}
G_1	0	0	$\sin \frac{\pi}{n}$	$-\sin \frac{\pi}{n}$	$\cos \frac{2\pi}{n}$	-1	$-\sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n}$
G_2	0	0	$-\sin \frac{\pi}{n}$	$\sin \frac{\pi}{n}$	1	$-\cos \frac{2\pi}{n}$	$-\sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n}$

Продолж. таблицы 2

Вектор Ось	Q_{15}	ΔN_1	ΔN_2	ΔN_3	ΔN_4
G_1	$\sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n}$	$\sin \frac{2\pi}{n}$	0	$-\cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n}$	$\cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n}$
G_2	$\sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n}$	0	$\sin \frac{2\pi}{n}$	$-\cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n}$	$\cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n}$

Уравнения проекций всех реактивных сил (рис. 19) на оси G_1 и G_2 имеют следующий вид (таблица 2):

$$\begin{aligned} & (Q_{10} - Q_{13}) \sin \frac{\pi}{n} + Q_3 \cos \frac{2\pi}{n} - Q_8 - Q_{12} \sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \\ & + Q_{15} \sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} + \Delta N_1 \sin \frac{2\pi}{n} - \Delta N_3 \cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \\ & + \Delta N_4 \cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} = 0, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & (Q_{13} - Q_{10}) \sin \frac{\pi}{n} + Q_3 - Q_8 \cos \frac{2\pi}{n} - Q_{12} \sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \\ & + Q_{15} \sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} + \Delta N_2 \sin \frac{2\pi}{n} - \Delta N_3 \cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \\ & + \Delta N_4 \cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Чтобы составить еще два уравнения для определения $\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3$ и ΔN_4 , рассмотрим равновесие выделенной из системы (рис. 1) части (рис. 20). На рис. 20 показаны две проекции (фасад и боковой вид) выделенной части и действующие на эту часть реактивные силы.

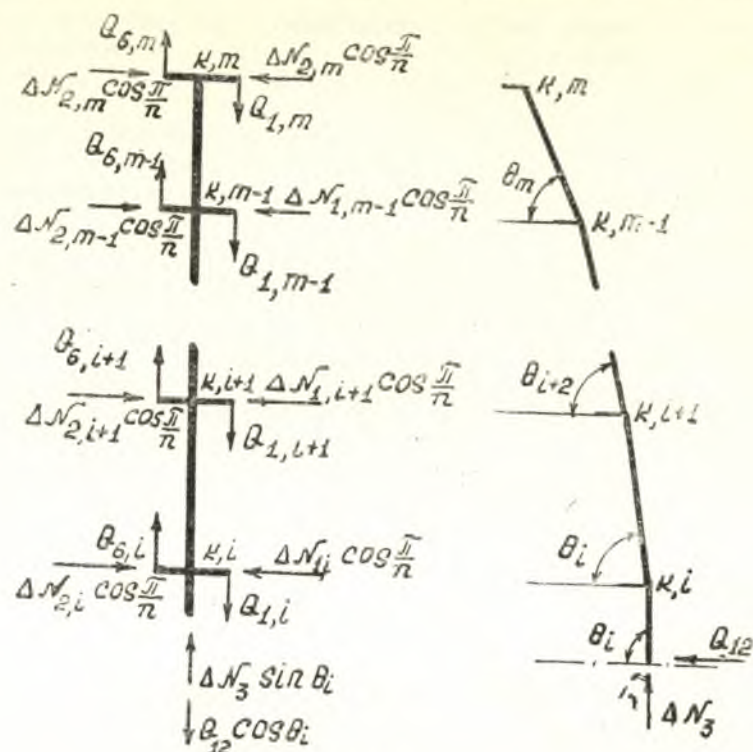


Рис. 20.

Составим уравнение проекций всех сил (рис. 20) на вертикальную ось:

$$\Delta N_3 \sin \theta_i - Q_{12} \cos \theta_i - \sum_{j=1}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) = 0. \quad (29)$$

Очевидно, аналогичное уравнение для той же части (рис. 20) без k, i -того узла будет (рис. 19):

$$\Delta N_4 \sin \theta_{i+1} - Q_{15} \cos \theta_{i+1} - \sum_{j=i+1}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) = 0. \quad (30)$$

Решив уравнения (27—30), получим выражения для величин ΔN_1 , ΔN_2 , ΔN_3 и ΔN_4 в функции от Q :

$$\begin{aligned} \Delta N_1 = & -\frac{1}{\sin \frac{2\pi}{n}} \left\{ Q_{10} \sin \frac{\pi}{n} - Q_{13} \sin \frac{\pi}{n} + Q_3 \cos \frac{2\pi}{n} - Q_8 - \right. \\ & \left. - Q_{12} \sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + Q_{15} \sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} - \right. \\ & \left. - \left[Q_{12} \operatorname{ctg} \theta_i + \frac{1}{\sin \theta_i} \sum_{j=i}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) \right] \cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \right. \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & + \left[Q_{15} \operatorname{ctg} \theta_{i+1} + \frac{1}{\sin \theta_{i+1}} \sum_{j=i+1}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) \right] \cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} \Big\}, \\ \Delta N_2 = & -\frac{1}{\sin \frac{2\pi}{n}} \left\{ (Q_{13} - Q_{10}) \sin \frac{\pi}{n} + Q_3 - Q_8 \cos \frac{2\pi}{n} - \right. \\ & \left. - Q_{12} \sin \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + Q_{15} \sin \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} - \right. \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & - \left[Q_{12} \operatorname{ctg} \theta + \frac{1}{\sin \theta_i} \sum_{j=i}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) \right] \cos \theta_i \cos \frac{\pi}{n} + \\ & + \left[Q_{15} \operatorname{ctg} \theta_{i+1} + \frac{1}{\sin \theta_{i+1}} \sum_{j=i+1}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}) \right] \cos \theta_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} \Big\}, \\ \Delta N_3 = & Q_{12} \operatorname{ctg} \theta_i + \frac{1}{\sin \theta_i} \sum_{j=i}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}), \end{aligned} \quad (33)$$

$$\Delta N_4 = Q_{15} \operatorname{ctg} \theta_{i+1} + \frac{1}{\sin \theta_{i+1}} \sum_{j=i+1}^m (Q_{1,j} - Q_{6,j}). \quad (34)$$

Имея выражения для всех векторов сил, составим сумму проекций векторов сил, приложенных к выделенной части (рис. 21). Выражение для величин (рис. 20) Q' и $\Delta N'$ (со штрихами) можно написать по аналогии с выражениями (13—20) и (31—34), для чего необходимо только в соответствующих Q и ΔN поменять индекс k на $k-1$, $k-1$ на $k-2$ и т. д.

Составим таблицу значений косинусов углов, образованных силами, приложенными к рассматриваемой части (рис. 21), и осью G_3 (таблица 3).

Таблица 3

Вектор / Ось	ΔN_2	ΔN_4	Q_{12}	Q_{15}
G_3	$-\cos \theta_i \sin \frac{\pi}{n}$	$\cos \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n}$	$-\sin \theta_i \sin \frac{\pi}{n}$	$\sin \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n}$

Продолж. таблицы 3

Вектор / Ось	Q_{10}	Q_{13}	Q_8	ΔN_2	$\Delta N_3'$	$\Delta N_4'$
G_3	$\cos \frac{\pi}{n}$	$-\cos \frac{\pi}{n}$	$-\sin \frac{2\pi}{n}$	$-\cos \frac{2\pi}{n}$	$\cos \theta_i \sin \frac{\pi}{n}$	$-\cos \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n}$

Продолж. таблицы 3

Вектор / Ось	Q'_{12}	Q'_{15}	Q'_{10}	Q'_{13}	Q'_3	$\Delta N_1'$
G_3	$\sin \theta_i \sin \frac{\pi}{n}$	$-\sin \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n}$	$\cos \frac{\pi}{n}$	$-\cos \frac{\pi}{n}$	$-\sin \frac{2\pi}{n}$	$\cos \frac{2\pi}{n}$

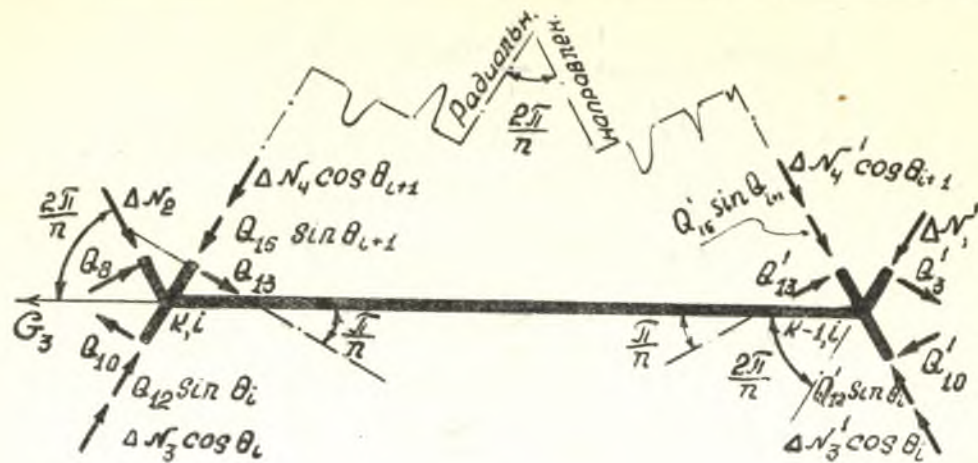


Рис. 21.

Теперь нетрудно написать четвертое типовое уравнение для узла k, i — это будет сумма проекций всех сил на ось G_3 :

$$\begin{aligned}
 & (\Delta N'_3 - \Delta N_3) \cos \theta_i \sin \frac{\pi}{n} + (\Delta N_4 - \Delta N'_4) \cos \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n} + \\
 & + (Q'_{12} - Q_{12}) \sin \theta_i \sin \frac{\pi}{n} + (Q_{15} - Q'_{15}) \sin \theta_{i+1} \sin \frac{\pi}{n} + \\
 & + (Q_{10} + Q'_{10} - Q_{13} - Q'_{13}) \cos \frac{\pi}{n} - (Q_8 + Q'_3) \sin \frac{2\pi}{n} + \\
 & + (\Delta N'_1 - \Delta N_2) \cos \frac{2\pi}{n} = 0. \tag{35}
 \end{aligned}$$

В уравнение (35) необходимо подставить значения перерезывающих сил и приращение нормальных сил в функции от основных неизвестных $\varphi_{ki}, \varphi_{k,i}, \dots, \delta_{k,i}$. Это можно сделать при помощи формул (13—20) и (31—34) и замены в этих формулах, при необходимости (для $\Delta N', Q'$ и т. д.), индексов k на $k-1$, $k-1$ на $k-2$ и т. д. После всех преобразований и выделений коэффициентов при одноименных радиальных, тангенциальных и вертикальных углах поворота узлов и при линейных смещениях вдоль добавочных стержней, получим в окончательном виде уравнение (35), т. е. четвертое типовое уравнение k, i -того узла.

В форме сокращенной записи четвертое уравнение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & D_i^{II} (\varphi_{k-1,i-1}^r + \varphi_{k,i-1}^r) + B_i^I (\varphi_{k-2,i}^r + \varphi_{k+1,i}^r) + B_i^{IV} (\varphi_{k,i}^r + \varphi_{k-1,i}^r) + \\
 & + D_i^I (\varphi_{k-2,i+1}^r + \varphi_{k+1,i+1}^r) + B_{i+1}^I (\varphi_{k-1,i+1}^r + \varphi_{k,i+1}^r) + \\
 & + \sum_{q=i+2}^m M_{q,i}^I (-\varphi_{k-2,q}^r + \varphi_{k-1,q}^r + \varphi_{k,q}^r - \varphi_{k+1,q}^r) + \\
 & + D_i^{III} (-\varphi_{k-1,i-1}^t + \varphi_{k,i-1}^t) + B_i^{II} (-\varphi_{k-2,i}^t + \varphi_{k+1,i}^t) + \\
 & + E_i^{IV} (-\varphi_{k-1,i}^t + \varphi_{k,i}^t) + B_{i+1}^{III} (-\varphi_{k-2,i+1}^t + \varphi_{k+1,i+1}^t) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + E_{i+1}^{II} (-\varphi_{k-1,i+1}^t + \varphi_{k,i+1}^t) + \sum_{q=i+2}^m M_{q,i}^{III} (-\varphi_{k-2,q}^t + \varphi_{k+1,q}^t) + \\
 & + \sum_{q=i+2}^m M_{q,i}^{II} (-\varphi_{k-1,q}^t + \varphi_{k,q}^t) - B_i^{III} (\varphi_{k-1,i-1}^v + \varphi_{k,i-1}^v) + \\
 & + D_i^{IV} (\varphi_{k-2,i}^v + \varphi_{k+1,i}^v) + B_i^{IV} (\varphi_{k-1,i}^v + \varphi_{k,i}^v) + \\
 & + B_{i+1}^{III} (\varphi_{k-1,i+1}^v + \varphi_{k,i+1}^v) + \sum_{j=1}^{i-2} T_{i,j}^{III} (\delta_{k-2,j} + \delta_{k+2,j}) + \\
 & + \sum_{j=1}^{i-2} T_{i,j}^{II} (\delta_{k-1,j} + \delta_{k+1,j}) + \sum_{j=1}^{i-2} T_{i,j}^I \delta_{k,j} + \\
 & + L_i^{III} (\delta_{k-2,i-1} + \delta_{k+2,i-1}) + L_i^{II} (\delta_{k-1,i-1} + \delta_{k+1,i-1}) + \\
 & + L_i^I \delta_{k,i-1} + L_i^{IV} (\delta_{k-2,i} + \delta_{k+2,i}) + \\
 & + A_i^{IV} (\delta_{k-1,i} + \delta_{k+1,i}) + \Gamma_i^{IV} \delta_{k,i} + L_{i+1}^{III} (\delta_{k-2,i+1} + \delta_{k+2,i+1}) + \\
 & + L_{i+1}^{II} (\delta_{k-1,i+1} + \delta_{k+1,i+1}) + L_{i+1}^I \delta_{k,i+1} + \\
 & + \sum_{q=i-2}^m T_{q,i}^{III} (\delta_{k-2,q} + \delta_{k+2,q}) + \sum_{q=i-2}^m T_{q,i}^{II} (\delta_{k-1,q} + \delta_{k+1,q}) + \sum_{q=i-2}^m T_{q,i}^I \delta_{q,k} = 0. \tag{36}
 \end{aligned}$$

Зависимости для составления детерминанта критического состояния многоярусной, многоугольной системы

Для составления детерминанта критического состояния n -угольной, m -этажной системы можно предварительно выпписать $4mm$ однородных уравнений, из которых $3m$ будут уравнения типа (24—26) и m уравнений типа (36). Однако для упрощения составления общего детерминанта гораздо лучше представить четыре типовых уравнения (24—26) и (36) условно в табличной форме (таблица 4). Она хорошо обозрима, на ней указаны границы изменения коэффициентов при неизвестных. Ниже приводится ряд сокращенных обозначений и значения коэффициентов A_i, B_i, C_i, \dots в зависимости от табулированных функций α, β, γ , геометрических и упругих свойств элементов системы:

$$\left. \begin{aligned}
 a_i^\omega &= 2b_i^\omega \alpha_i^\omega, \\
 u_i^\omega &= 2b_i^\omega \beta^\omega, \\
 f_i &= 2b_i^\omega \frac{(\alpha + \beta)_i^\omega}{l_i}, \\
 d_i^\omega &= 2b_i^\omega \frac{\gamma_i^\omega}{l_i^2}, \\
 \mu_i &= \text{ctg } \theta_i - \text{ctg } \theta_{i+1}, \\
 S_i &= \sum_{j=i}^m d_{ij}^r,
 \end{aligned} \right\} \begin{cases} \omega = r, t, cr, ct \\ \text{при } \omega = r, t - l_i = l_i^r \\ \text{при } \omega = cr, ct - l_i = l_i^c \end{cases}$$

Таблица 4

тип расчетной системы	φ ₂				φ ₁				φ ₀			
	l-1	l	l+1	l+2	l-1	l	l+1	l+2	l-1	l	l+1	l+2
I	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}
	φ ₂ ^{l-3}	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₁ ^{l-3}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₀ ^{l-3}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l
	φ ₂ ^{l-4}	φ ₂ ^{l-3}	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₁ ^{l-4}	φ ₁ ^{l-3}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₀ ^{l-4}	φ ₀ ^{l-3}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}
II	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
III	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
IV	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}

тип расчетной системы	φ ₂				φ ₁				φ ₀			
	l-1	l	l+1	l+2	l-1	l	l+1	l+2	l-1	l	l+1	l+2
I	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}
	φ ₂ ^{l-3}	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₁ ^{l-3}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₀ ^{l-3}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l
	φ ₂ ^{l-4}	φ ₂ ^{l-3}	φ ₂ ^{l-2}	φ ₂ ^{l-1}	φ ₁ ^{l-4}	φ ₁ ^{l-3}	φ ₁ ^{l-2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₀ ^{l-4}	φ ₀ ^{l-3}	φ ₀ ^{l-2}	φ ₀ ^{l-1}
II	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
III	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}
IV	φ ₂ ^{l-1}	φ ₂ ^l	φ ₂ ^{l+1}	φ ₂ ^{l+2}	φ ₁ ^{l-1}	φ ₁ ^l	φ ₁ ^{l+1}	φ ₁ ^{l+2}	φ ₀ ^{l-1}	φ ₀ ^l	φ ₀ ^{l+1}	φ ₀ ^{l+2}

$$\Gamma_i^I = 2a_i^r \cos^2 \frac{\pi}{n} + a_i^{cr} \sin^2 \theta_i + a_{i+1}^{cr} \sin^2 \theta_{i+1} + 2b_i^{kp} \sin^2 \frac{\pi}{n} + b_i^{c,kp} \cos^2 \theta_i + b_{i+1}^{c,kp} \cos^2 \theta_{i+1},$$

$$\Gamma_i^{II} = 2a_i^r \sin^2 \frac{\pi}{n} + a_i^{ct} + a_{i+1}^{ct} + 2b_i^{kp} \cos^2 \frac{\pi}{n},$$

$$\Gamma_i^{III} = 2a_i^t + a_i^{cr} \cos^2 \theta_i + a_{i+1}^{cr} \cos^2 \theta_{i+1} + b_i^{c,kp} \sin^2 \theta_i + b_{i+1}^{c,kp} \sin^2 \theta_{i+1},$$

$$\Gamma_i^{IV} = \frac{3d_i^r \operatorname{ctg}^2 \theta_i}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{3\mu_i^2}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1} + 2d_i^t \left(1 + 3 \operatorname{ctg}^2 \frac{2\pi}{n} \right) + \frac{d_i^{cr} + d_{i+1}^{cr}}{2 \cos^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{d_i^{ct}}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_i} + \frac{d_{i+1}^{ct}}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_{i+1}};$$

$$A_i^I = u_i^r \cos^2 \frac{\pi}{n} + b_i^{kp} \sin^2 \frac{\pi}{n},$$

$$A_i^{II} = -u_i^r \sin^2 \frac{\pi}{n} - b_i^{kp} \cos^2 \frac{\pi}{n},$$

$$A_i^{III} = u_i^t,$$

$$A_i^{IV} = -\frac{d_i^r \operatorname{ctg}^2 \theta_i}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - \frac{\mu_i^2}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1} - \frac{4d_i^t \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{n}}{\sin \frac{2\pi}{n}} + \frac{d_i^{cr} + d_{i+1}^{cr}}{4 \cos^2 \frac{\pi}{n}} - \frac{d_i^{ct}}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_i} - \frac{d_{i+1}^{ct}}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_{i+1}};$$

$$B_i^I = \frac{1}{2} f_i^r \operatorname{ctg} \theta_i \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n},$$

$$B_i^{II} = -\frac{1}{2} f_i^r \operatorname{ctg} \theta_i,$$

$$B_i^{III} = \frac{f_i^{cr} \cos \theta_i}{2 \cos \frac{\pi}{n}},$$

$$B_i^{IV} = -\frac{1}{2} f_i^r \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} \operatorname{ctg} \theta_i + \frac{f_i^{cr} \sin \theta_i}{2 \cos \frac{\pi}{n}} - \frac{f_{i+1}^{cr} \sin \theta_{i+1}}{2 \cos \frac{\pi}{n}};$$

$$B_i = -\frac{f_i^{cr} \sin \theta_i}{2 \cos \frac{\pi}{n}} - \frac{1}{2} f_i^{p_{i-1}} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n},$$

(37)

$$\begin{aligned}
B_i^{II} &= \frac{1}{2} (u_i^r - b_i^{kp}) \sin \frac{2\pi}{n}, \\
B_i^{III} &= -\frac{1}{2} f_i^r \mu_{i-1}, \\
B_i^{IV} &= f_i^t \frac{1 - 2 \cos \frac{2\pi}{n}}{\sin \frac{2\pi}{n}} - \frac{1}{2} f_i^{cr} \frac{\cos \theta_i}{\cos \frac{\pi}{n}} + \frac{1}{2} f_{i+1}^{cr} \frac{\cos \theta_{i+1}}{\cos \frac{\pi}{n}}; \\
D_i^I &= \frac{1}{2} f_i^r \mu_{i-1} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}, \\
D_i^{II} &= \frac{1}{2} f_i^{cr} \frac{\sin \theta_i}{\cos \frac{\pi}{n}}, \\
D_i^{III} &= -\frac{f_i^{ct}}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_i}, \\
D_i^{IV} &= \frac{f_i^t}{\sin \frac{2\pi}{n}}; \\
E_i^I &= -\frac{1}{2} (u_i^{cr} + b_i^{c, kp}) \sin 2\theta_i, \\
E_i^{II} &= \frac{3}{2} f_i^r \mu_{i-1} + \frac{f_i^{ct}}{2 \sin \frac{\pi}{n} \cos \theta_i}, \\
E_i^{III} &= -\frac{1}{2} (u_i^r - b_i^{c, kp}) \sin 2\theta_i - \frac{1}{2} (u_{i+1}^{cr} - b_{i+1}^{c, kp}) \sin 2\theta_{i+1}, \\
E_i^{IV} &= \frac{3}{2} f_i^t \operatorname{ctg} \theta_i - \frac{f_i^{ct}}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_i} + \frac{f_{i+1}^{ct}}{2 \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta_{i+1}}; \\
K_i^I &= u_i^{cr} \sin^2 \theta_i - b_i^{c, kp} \cos^2 \theta_i, \\
K_i^{II} &= u_i^{ct}, \\
K_i^{III} &= u_i^{cr} \cos^2 \theta_i - b_i^{c, kp} \sin^2 \theta_i; \\
L^I &= \frac{3d_i^r \mu_{i-1} \operatorname{ctg} \theta_i}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{3\mu_i \mu_{i-1}}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1} - \frac{d_i^{cr}}{2 \cos^2 \frac{\pi}{n}} - \frac{d_i^{ct}}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_i}, \\
L_i^{II} &= \frac{d_i^r \mu_{i-1} \operatorname{ctg} \theta_i}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - \frac{d_i^{cr}}{4 \cos^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{d_i^{ct}}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n} \sin^2 \theta_i} - \frac{\mu_i \mu_{i-1}}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1},
\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
L_i^{III} &= \frac{d_i^r \mu_{i-1} \operatorname{ctg} \theta_i}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{\mu_i \mu_{i-1}}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1}, \\
L_i^{IV} &= \frac{d_i^r \operatorname{ctg}^2 \theta_i}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \frac{d_i^t}{\sin^2 \frac{2\pi}{n}} + \frac{\mu_i^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{i+1}; \\
M_{p,s}^I &= -\frac{1}{2} f_p^r \mu_s \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}, \\
M_{p,s}^{II} &= \frac{3}{2} f_p^r \mu_s, \\
M_{p,s}^{III} &= -\frac{1}{2} f_p^r \mu_s; \\
T_{p,s}^I &= \frac{3}{2} \frac{d_p^r \mu_s}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} \operatorname{ctg} \theta_p + \frac{3}{2} \frac{\mu_p \mu_s}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{p+1}, \\
T_{p,s}^{II} &= -\frac{d_p^r \mu_s}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} \operatorname{ctg} \theta_p - \frac{\mu_p \mu_s}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{p+1}, \\
T_{p,s}^{III} &= \frac{d_p^r \mu_s}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \operatorname{ctg} \theta_p + \frac{\mu_p \mu_s}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}} S_{p+1}.
\end{aligned} \tag{37}$$

По таблице 4 можно, меняя индекс i от 1 до m и индекс k от 1 до n , составить определитель критического состояния для m -этажной, n -угольной системы. Порядок этого определителя будет равен, как было ранее показано, $4mn$, и даже при расчете систем с малым количеством сторон и этажей раскрыть определитель критического состояния является исключительно трудной задачей.

Исследуя определители (составленные по таблице 4) с инженерной точки зрения, нам удалось их преобразовать в квазидиагональный вид. Это обстоятельство дало возможность заменить раскрытие определителя $4mn$ -того порядка раскрытием ряда определителей, каждый из которых, вообще говоря, не выше $4m$ -го порядка, а для множества частных задач определители $4m$ -го порядка, в свою очередь, распадаются на ряд еще более простых. Размеры статьи не позволяют нам проиллюстрировать все выкладки. Рассмотрим расчет устойчивости двухэтажной шестиугольной водонапорной башни (рис. 22), причем для сокращения выкладок будем ссылаться на некоторые результаты [2], полученные при исследовании устойчивости одноэтажных систем.

Проверка устойчивости водонапорной башни

На рис. 22 показана схема двухэтажной шестиугольной башни. Для расчета ее на устойчивость необходимо составить определитель, порядок которого равен $4 \times 2 \times 6 = 48$. Не говоря уже о раскрытии, но даже составление такого определителя является весьма громоздкой работой, но пользуясь таблицей 4, можно составление определителя критического состояния свести к автоматическому вписыванию в соответствующие места коэффициентов (37).

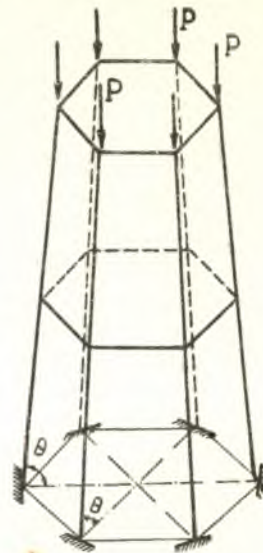


Рис. 22.

В таблице 5, в очерченном двойными линиями квадрате, показан в условном виде определитель сорок восьмого порядка, соответствующий критическому состоянию двухэтажной шестиугольной системы. Он разделен на 8×8 меньших частей $a_1^I, a_5^I, a_7^I \dots$ и т. д. Каждая из этих частей $a_1^I, a_5^I, a_7^I \dots$ должна была бы быть, в свою очередь, поделена на 6 строк и 6 столбцов (36 клеток), где необходимо было бы вписать коэффициенты из (37) или таблицы 4. Однако такая заполненная коэффициентами (37) таблица, состоящая из 48×48 клеток, должна была бы занять много места, поэтому мы ограничились условной таблицей 5.

При помощи таблицы 4 нетрудно показать части $a_1^I, a_1^{II}, a_2^{II} \dots$ таблицы 5 в развернутом виде. Например, в таблице 6 показана часть a_1^I , а в таблице 7 часть a_9^{II} в развернутом виде.

В таблице 5 обозначены лишь части, находящиеся на главной диагонали и правее ее, причем нулевые части не заполнены. Ну-

Таблица 5

Критическое состояние	Формы	Формы							
		φ^2	φ^2	φ^4	δ	φ^2	φ^2	φ^4	δ
K_1	I	a_1^I	a_5^I	a_6^I	a_7^I	a_{10}^I		a_{11}^I	a_{20}^I
K_2	II	—	a_2^I		a_6^I		a_{13}^I		a_{14}^I
K_3	III	—		a_3^I	a_9^I	a_{15}^I		a_{16}^I	a_{17}^I
K_4	IV	—	—	—	a_4^I	a_{18}^I	a_{19}^I	a_{20}^I	a_{21}^I
K_1	I	—	—	—	a_1^{II}	a_5^{II}	a_6^{II}	a_7^{II}	
K_2	II	—	—	—		a_2^{II}			a_8^{II}
K_3	III	—	—	—	—		a_3^{II}	a_9^{II}	
K_4	IV	—	—	—	—	—	—		a_{14}^{II}

Таблица 6

Γ_1^I	A_1^I				A_1^I
A_1^I	Γ_1^I	A_1^I			
	A_1^I	Γ_1^I	A_1^I		
		A_1^I	Γ_1^I	A_1^I	
			A_1^I	Γ_1^I	A_1^I
A_1^I				A_1^I	Γ_1^I

Таблица 7

B_2^{IV}	B_2^{IV}	D_2^{IV}			D_2^{IV}
D_2^{IV}	B_2^{IV}	B_2^{IV}	D_2^{IV}		
	D_2^{IV}	B_2^{IV}	B_2^{IV}	D_2^{IV}	
		D_2^{IV}	B_2^{IV}	B_2^{IV}	D_2^{IV}
D_2^{IV}			D_2^{IV}	B_2^{IV}	B_2^{IV}
B_2^{IV}	D_2^{IV}			D_2^{IV}	B_2^{IV}

левые части, находящиеся левее главной диагонали, отмечены дужками. В этих частях (обозначенных дужками) должны быть те же коэффициенты из (37), что и в симметрично расположенных им частях относительно главной диагонали, т. е. все коэффициенты A_1^I, B_1^I, \dots и т. д. из (37) или из таблицы 4 должны быть симметрично расположены относительно главной диагонали.

Проследим за преобразованиями с элементами определителя критического состояния, благодаря которым он принимает квазидиагональный вид.

Для того, чтобы определитель (таблица 5) остался симметричным после преобразований, операции (линейные комбинации), проделанные с его столбцами, необходимо повторить и для соответствующих строк.

В таблице 5 отдельные этажи отделены друг от друга жирными линиями. Над частями (и левее их) каждого этажа записаны в условном виде три типа комбинаций, которые надлежит проделать со столбцами (строками) данной части, чтобы во всех ее клетках, за исключением диагональных, появились нули. Комбинации эти названы K_1, K_2, K_3 . Комбинации согласно K_1 будут:

$$\begin{matrix}
 1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\
 1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\
 0 & +0,866 & +0,866 & +0 & -0,866 & -0,866 \\
 1 & +0,5 & -0,5 & -1 & -0,5 & +0,5 \\
 0 & +0,866 & -0,866 & +0 & +0,866 & -0,866 \\
 1 & -0,5 & -0,5 & +1 & -0,5 & -0,5
 \end{matrix} \quad (38)$$

Если мы в K_1 в третьей и пятой строчках изменим знаки на обратные и поменяем местами третью строчку с четвертой, а пятую строчку с шестой, то получим K_2 .

Комбинации с элементами детерминанта согласно K_3 имеют вид

$$\begin{matrix}
 1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\
 1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\
 -0,5 & +0,5 & +1 & +0,5 & -0,5 & -1 \\
 0,866 & +0,866 & +0 & -0,866 & -0,866 & +0 \\
 -0,866 & +0,866 & +0 & -0,866 & +0,866 & +0 \\
 0,5 & +0,5 & -1 & +0,5 & +0,5 & -1.
 \end{matrix} \quad (39)$$

Операции согласно K_1, K_2, K_3 необходимо понимать в следующем смысле. Например, над частью (и левее) a_1^1 таблицы 5 указано, что с ее элементами, т. е. со столбцами (строками), необходимо проделать преобразования типа K_1 (38). Для этого нужно вместо первого элемента первого столбца части a_1^1 (таблица 6), т. е. вместо Γ_1^1 поставить согласно (38):

$$1\Gamma_1^1 - 1A_1^1 + 1 \cdot 0 - 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 - 1A_1^1 = \Gamma_1^1 - 2A_1^1. \quad (40)$$

Вместо второго элемента первого столбца таблицы 6, т. е. вместо A_1 необходимо поставить согласно (38).

$$A_1^1 - \Gamma_1^1 + A_1^1 - 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = -\Gamma_1^1 + 2A_1^1. \quad (41)$$

Вместо первого элемента четвертого столбца таблицы 6 (вместо нуля) нужно поставить согласно K_1 (38):

$$1\Gamma_1^1 + 0,5A_1^1 - 0,5 \cdot 0 - 1 \cdot 0 - 0,5 \cdot 0 + 0,5A_1^1 = \Gamma_1^1 + A_1^1. \quad (42)$$

Проделав со всеми столбцами таблицы 6 (части a_1^1) линейные комбинации согласно K_1 (38), получим преобразованную таблицу 6, в которой подавляющее число элементов отличается от нуля, вернее получим более сложную (заполненную) таблицу. Однако, проделав со строками преобразованной таблицы линейные комбинации согласно K_1 , получим таблицу, в которой все элементы, кроме элементов, расположенных на главной диагонали, равны нулю, т. е. получим таблицу, в так называемом диагональном виде.

Познакомившись с процессом преобразования отдельных частей $a_1^1, a_5^1 \dots$ определителя критического состояния (таблица 5) согласно K_1, K_2, K_3 , заметим, что все части $a_1^1, a_2^1 \dots$ таблицы 5 после указанных преобразований примут диагональный вид. Естественно, что при данных преобразованиях определитель критического состояния (таблица 5) умножается на какой-то множитель, отличный от нуля, который можно было бы вычислить. Однако, так как для определения критической нагрузки необходимо определитель критического состояния приравнять нулю, то безразлично, на какой именно множитель (отличный от нуля) он умножается.

Имея все части $a_1^1, a_5^1, a_9^1 \dots$ определителя критического состояния в диагональном виде, можно [2] при помощи перестановки столбцов (строк) этого определителя представить в квазидиагональном виде, т. е. представить его как произведение ряда более простых определителей, сумма порядков которых равна порядку определителя критического состояния (в нашем случае 48). При этом часть из распавшихся определителей попарно равны друг другу и раскрыть необходимо лишь половину из них.

Приведем те из распавшихся определителей (после указанных ранее преобразований), которые необходимо раскрыть, чтобы произвести расчет устойчивости двухэтажной шестиугольной башни (рис. 22):

$\Gamma_1^1 - 2A_1^1$	$-2B_1^1 X_1$	E_1^1	$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	K_2^1	0	E_2^1	$2A_2^1 Y_2$	= 0 (43)
$-2B_1^1 X_1$	$\Gamma_1^1 - 2A_1^1$	0	$2(B_1^1 X_1 + E_1^1 X_2)$	0	K_2^1	0	$2A_2^1 X_2$	
E_1^1	0	$\Gamma_1^1 - 2A_1^1$	$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	E_2^1	0	K_2^1	$-2B_2^1 Y_2$	
$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	$2(B_1^1 X_1 + E_1^1 X_2)$	$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	$\Gamma_1^1 - 2A_1^1$	$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	$\Gamma_2^1 - 2A_2^1$	$-2B_2^1 X_2$	E_2^1	
K_2^1	0	E_2^1	$2(B_1^1 Y_1 + B_2^1 Y_2)$	$\Gamma_2^1 - 2A_2^1$	$-2B_2^1 X_2$	E_2^1	$2(B_2^1 Y_2 + B_3^1 Y_3)$	
0	K_2^1	0	$2(B_1^1 X_1 + E_1^1 X_2)$	$-2B_2^1 X_2$	$\Gamma_2^1 - 2A_2^1$	0	$2(B_2^1 X_2 + E_2^1 X_3)$	
E_2^1	0	K_2^1	$2B_2^1 Y_2$	E_2^1	0	$\Gamma_2^1 - 2A_2^1$	$2(B_2^1 Y_2 + B_3^1 Y_3)$	
$2A_2^1 Y_2$	$2A_2^1 X_2$	$-2B_2^1 Y_2$	$2(B_2^1 Y_2 + B_3^1 Y_3)$	$2(B_2^1 X_2 + E_2^1 X_3)$	$2(B_2^1 Y_2 + B_3^1 Y_3)$	$\Gamma_2^1 - 2A_2^1$	$2(B_2^1 X_2 + E_2^1 X_3)$	

где:

$$\begin{cases} X_1 = \sin(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ X_2 = \sin 1,5(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ X_3 = \sin 0,5(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ Y_1 = \cos(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ Y_2 = \cos 1,5(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ Y_3 = \cos 0,5(j-1) \frac{2\pi}{n}, \\ Y_4 = \cos 2(j-1) \frac{2\pi}{n}; \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

При $j=1$, определитель (43) распадается на определители шестого и второго порядка; при $j=4$, определитель (43) распадается на два определителя четвертого порядка.

Таким образом, мы практически невыполнимую задачу — раскрытие определителя сорок восьмого порядка свели к раскрытию нескольких определителей, из которых два наиболее трудных — определители восьмого порядка (43). Наименьшие корни определителей (43) характеризуют весь спектр критических нагрузок для системы (рис. 22). При этом исследовании мы не потеряли ни одного из корней задачи. Наименьший из всех корней характеризует наименьшую, вернее практически реальную критическую нагрузку.

На примере расчета устойчивости двухэтажной шестиугольной башни мы проиллюстрировали процесс разложения определителей высоких порядков, соответствующих рассматриваемым нами задачам. Полученное нами общее решение для расчета устойчивости m -этажных, n -угольных систем, где m и n — любые целые числа, изложим в отдельной работе.

Важно отметить, что решение поставленной задачи удалось получить лишь благодаря инженерному подходу к изучению явления. Предложенные комбинации K_1, K_2, K_3 с элементами определителя найдены после выявления форм потери устойчивости системы (рис. 22).

Как видно из (37) и (43), разная нагрузка на различных этажах не усложняет расчета. Если в системе (рис. 22) имеются междуэтажные

ные перекрытия, которые накладывают на узлы дополнительные связи, то количество независимых неизвестных (таблица 4) уменьшается и решение задачи еще более упрощается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корноухов Н. В. Прочность и устойчивость стержневых систем, 1949.
2. Бородянский М. Я. Устойчивость пространственных циклически-симметричных каркасов, Труды Института строительной механики АН УССР, № 17, 1952.

(Получена редакцией 1 февраля 1952 г.)

Доц. БОРОДЯНСКИЙ М. Я.,
кандидат технических наук

ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

(Кафедра сопротивления материалов и теоретической механики)

В нашей статье [2] был предложен приближенный способ расчета устойчивости плоских рам со смешивающимися узлами, подверженных действию узловых нагрузок. В данной статье показано применение того же способа для расчета устойчивости пространственных рам. При этом предполагается, что до потери устойчивости конструкции в ее элементах действуют лишь нормальные силы.

Выражение для потенциальной энергии системы

В момент потери устойчивости по концам каждого стержня пространственной рамы, в общем случае, кроме нормальных сил, появляются также изгибающие и крутящие моменты. Представим их в виде векторов в трех взаимноперпендикулярных направлениях. Векторы изгибающих моментов направим параллельно главным центральным осям (y , z) поперечного сечения, а вектор крутящего момента—вдоль оси стержня.

Изгибающие моменты вызывают углы поворота, а крутящие—углы закручивания. Представим эти перемещения (углы поворота и углы закручивания) также в виде векторов, которые будут параллельны векторам сил.

Каждые из названных силовых факторов производят работу лишь на соответствующих им перемещениях. Таким образом, потенциальную энергию сжатого стержня пространственной рамы в момент потери устойчивости можно получить, сложив потенциальную энергию изгиба в двух главных плоскостях инерции с потенциальной энергией кручения относительно продольной оси стержня. Сложив энергию всех стержней пространственной рамы, получим выражение для потенциальной энергии всей системы:

$$V = \sum (V^z + V^y + V^{kp}), \quad (1)$$

где:

$V^z + V^y$ — энергия изгиба стержня,

V^{kp} — энергия кручения того же стержня.

Выразив энергию изгиба через углы поворотов концов стержня [2] и пользуясь элементарной формулой из курса сопротивления ма-

териалов для определения потенциальной энергии кручения, можно формулу (1) представить в следующем виде:

$$V = \sum_{i=1}^m \left\{ 2b^y [(\varphi_a^y - \varphi_b^y)^2 + 3(\varphi_a^y - \psi_{ab}^y)(\varphi_b^y - \psi_{ab}^y)] + 2b^z [(\varphi_a^z - \varphi_b^z)^2 + 3(\varphi_a^z - \psi_{ab}^z)(\varphi_b^z - \psi_{ab}^z)] + \frac{l^{kp}}{2} [\varphi_a^{kp} - \varphi_b^{kp}]^2 \right\}, \quad (2)$$

где:

b^y, b^z — погонная жесткость $\left(\frac{EI}{l}\right)$ стержня на изгиб относительно главных центральных осей инерции (y и z) его поперечного сечения,

φ_a, φ_b — углы поворота концов стержня,

ψ_{ab} — угол перекоса стержня, равный $\frac{\delta}{l}$, где: δ — линейное смещение одного конца стержня относительно его другого конца в перпендикулярном направлении к его оси, а l — длина стержня. Верхний индекс (y или z) при величинах указывает ось, которой параллелен вектор данной величины,

l^{kp} — погонная жесткость стержня $\left(\frac{GI^{kp}}{l}\right)$ на кручение,

$\varphi_a^{kp}, \varphi_b^{kp}$ — углы закручивания концевых сечений стержня,

m — количество стержней системы.

Выражение для работы внешних сил

Для вычисления работы внешних сил воспользуемся формулой

$$T = \sum_{i=1}^m N_i \Delta l_i, \quad (3)$$

где:

N_i — продольное усилие в i -том стержне,

Δl_i — сближение концов i -того стержня по направлению действия N_i , вызванное поворотом и искривлением стержня в двух главных плоскостях, а также его закручиванием относительно своей продольной оси.

Сближение концов стержня от одного лишь его закручивания можно определить по формуле:

$$\Delta l^{kp} = \frac{\lambda}{l} (\varphi_a^{kp} - \varphi_b^{kp})^2, \quad (4)$$

где λ — коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения [1]

Добавив к Δl^{kp} величину сближения концов стержня, вызванную поворотом и искривлением стержня [2] в двух плоскостях, и вставив эти данные в (3), получим выражение для определения величины работы внешних сил T :

$$T = \sum_{i=1}^m N_i \left\{ \frac{l}{30} [2(\varphi_a^y - \psi_{ab}^y)^2 + 2(\varphi_b^y - \psi_{ab}^y)^2 - (\varphi_a^y - \psi_{ab}^y)(\varphi_b^y - \psi_{ab}^y)] + \right.$$

$$\left. + 15(\psi_{ab}^z)^2 \right\} + \frac{l}{30} [2(\varphi_b^z - \psi_{ab}^z)^2 + 2(\varphi_a^z - \psi_{ab}^z)^2 - (\varphi_a^z - \psi_{ab}^z)(\varphi_b^z - \psi_{ab}^z)] + 15(\psi_{ab}^z)^2 + \frac{\lambda}{l} [\varphi_a^{kp} - \varphi_b^{kp}]^2 \}. \quad (5)$$

Составление уравнений для определения критической нагрузки

Мы выразили потенциальную энергию (2) и работу внешних сил (5) через кинематически-независимые величины φ и ψ , значения которых нам неизвестны (те же неизвестные, что и в методе деформации).

Для момента потери устойчивости будем пользоваться уравнением $V - T = 0$; запишем его условно в виде:

$$F(\varphi, \psi, P_{kp}) = 0, \quad (6)$$

где P_{kp} — критическая нагрузка.

Пусть имеется у рамы r независимых углов поворота φ и s независимых углов перекоса ψ , тогда систему $r + s$ уравнений для определения критической нагрузки получим, продифференцировав (6) поочередно по всем φ и ψ :

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi_q} = 0, \quad (q = 1, 2, \dots, r) \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \psi_j} = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, s) \quad (8)$$

Систему уравнений (7), (8) — линейную относительно неизвестных φ_q и ψ_j — перепишем в форме:

$$\sum_{q=1}^r a_{m,q} \varphi_q + \sum_{j=1}^s a_{m,j} \psi_j = 0, \quad (m=1, 2, \dots, r+s) \quad (9)$$

Так как в момент потери устойчивости все кинематически-независимые неизвестные величины φ и ψ , или часть из них отличаются от нуля, то для этого необходимо, чтобы определитель, составленный из коэффициентов $a_{m,q}, a_{m,j}$, при неизвестных уравнения (9) был равен нулю:

$$\begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,r} & \dots & a_{1,r+s} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,r} & \dots & a_{2,r+s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,r} & \dots & a_{m,r+s} \\ a_{r+s,1} & a_{r+s,2} & \dots & a_{r+s,r} & \dots & a_{r+s,r+s} \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

Элементы уравнения критического состояния (10) состоят из алгебраических функций от неизвестной критической нагрузки. Таким образом, для определения ее (критической нагрузки) не нужно при

бегать к трансцендентным функциям или к специальным таблицам, как это имеет место в методе деформаций.

Согласно изложенному, порядок расчета рамы на устойчивость представляется в следующем виде. По данной схеме рамы устанавливаем r независимых углов поворота φ и s независимых углов перекоса ψ , составляем систему r уравнений (7) и s уравнений (8). Далее составляем условие критического состояния (10) и из полученного алгебраического уравнения находим наименьший корень, определяющий критическую нагрузку.

Расчет устойчивости одноэтажных рамных куполов

В предложенном способе, как уже было сказано, в качестве неизвестных служат те же величины, что и в методе деформаций, т. е. для определения критической нагрузки приходится раскрывать определитель такого же порядка, как и при решении по методу деформаций. В методе деформаций приходится раскрывать определитель, элементы которого являются сложными трансцендентными функциями; получить решение в замкнутом виде, как правило, не удастся. В предлагаемом способе элементы определителя являются алгебраическими функциями, что дает возможность непосредственно вывести алгебраическое уравнение для определения критической нагрузки. Недостатком является то, что сами элементы определителя заданы приближенно, ибо мы приняли изогнутую ось каждого стержня не по синусоиде, а по параболе.

Для суждения о точности предложенного способа рассмотрим устойчивость таких пространственных систем, которые нами уже решены точным способом и проверены опытным путем [3], т. е. рассмотрим устойчивость одноэтажных циклически-симметричных рам. Для расчета таких систем придется составить $4n$ уравнений и рассмотреть определитель $4n$ -го порядка, где n — количество граней купола. Показано, что, не вникая в суть элементов данного определителя, можно его раскрытие заменить раскрытием ряда определителей, каждый из которых не выше четвертого порядка.

Внешний вид этих определителей [3] следующий:

$$\begin{vmatrix} \Gamma_1 + 2AY_1 & -2BX_1 & \Pi & 2CY_2 + 2DY_3 \\ -2BX_1 & \Gamma_2 + 2FY_1 & 0 & 2LX_2 + 2MX_3 \\ \Pi & 0 & \Gamma_3 + 2NY_1 & 2RY_2 + 2SY_3 \\ 2CY_2 + 2DY_3 & 2LX_2 + 2MX_3 & 2RY_2 + 2SY_3 & \Gamma_4 + 2TY_4 + 2KY_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \sin(i-1) \frac{2\pi}{n}, & Y_1 &= \cos(i-1) \frac{2\pi}{n}, \\ X_2 &= \sin 1,5(i-1) \frac{2\pi}{n}, & Y_2 &= \cos 1,5(i-1) \frac{2\pi}{n}, \\ X_3 &= \sin 0,5(i-1) \frac{2\pi}{n}, & Y_3 &= \cos 0,5(i-1) \frac{2\pi}{n}, \\ & & Y_4 &= \cos 2(i-1) \frac{2\pi}{n}, \end{aligned} \quad (12)$$

где:

$$i = 1, 2, 3, \dots, \left(\frac{n}{2} + 1\right) \text{ при четном } n,$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, \frac{n+1}{2} \text{ при нечетном } n.$$

При $i=1$ определитель (11) распадается на один определитель третьего порядка и один первого. В системах с четным количеством сторон, при $i = \frac{n}{2} + 1$ определитель (11) распадается на два определителя второго порядка. Так как в нашем случае элементы определителя (11) являются алгебраическими функциями, то нетрудно его раскрыть в общем виде.

Уравнение четвертого порядка, которое получилось в результате раскрытия определителя (11), имеет вид:

$$\Omega_4 P^4 - \Omega_2 P^3 + \Omega_2 P^2 - \Omega_1 P + \Omega_0 = 0, \quad (13)$$

где:

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= \sum_{j=1}^6 c_j' c_j'', \\ \Omega_1 &= \sum_{j=1}^6 (b_j' c_j'' + c_j' b_j''), \\ \Omega_2 &= \sum_{j=1}^6 (a_j' c_j'' + b_j' b_j'' + c_j' c_j''), \\ \Omega_3 &= \sum_{j=1}^6 (a_j' b_j'' + b_j' a_j''), \\ \Omega_4 &= \sum_{j=1}^6 a_j' a_j'' \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} a_1' &= f_1 f_2 - f_0^2, & a_2' &= f_0, \\ b_1' &= -f_1 F_2 - f_2 F_1 + 2f_0 F_0, & b_2' &= -F_0, \\ c_1' &= F_1 F_2 - F_0^2, & c_2' &= 0, \\ a_1'' &= f_3 f_4 - f_7^2, & a_2'' &= -f_6 f_7, \\ b_1'' &= -f_3 F_4 - F_4 f_3 + 2f_7 F_7, & b_2'' &= f_6 F_7 + f_7 F_6, \\ c_1'' &= F_3 F_4 - F_7^2, & c_2'' &= -F_6 F_7, \\ a_3' &= f_1 f_6 + f_0 f_5, & a_4' &= f_2, \\ b_3' &= -f_1 F_6 - f_6 F_1 - f_5 F_0 - f_0 F_5, & b_4' &= -F_2, \\ c_3' &= F_1 F_6 + F_0 F_5, & c_4' &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{array}{l}
 a_3'' = -f_3 f_6, \\
 b_3'' = f_3 F_6 + f_6 F_3, \\
 c_3'' = -F_3 F_6, \\
 a_5' = f_0 f_6 + f_2 f_5, \\
 b_5' = -f_0 F_6 - f_6 F_0 - f_5 F_2 - f_2 F_5, \\
 c_5' = F_0 F_6 + F_2 F_5, \\
 a_5'' = -f_7 - f_3 f_5, \\
 b_5'' = F_7 + f_3 F_5 + f_5 F_3, \\
 c_5'' = -F_3 F_5.
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 a_4'' = -f_4 - f_5 f_7, \\
 b_4'' = F_4 + f_7 F_5 + f_5 F_7, \\
 c_4' = -F_5 F_7, \\
 a_6' = -f_6, \\
 b_6' = F_6, \\
 c_6' = 0, \\
 a_6'' = -f_6, \\
 b_6'' = F_6, \\
 c_6'' = 0.
 \end{array}
 \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 F_0 &= (2b^r - b^{kp}) X_1 \sin \frac{2\pi}{n}, \\
 f_0 &= -\left(\frac{1}{60} + \lambda_0\right) 2\mu X_1 \sin \frac{2\pi}{n}, \\
 F_1 &= 4b^{c,r} \sin^2 \theta + b^{c,kp} \cos^2 \theta + 4b^r (2 + Y_1) \cos^2 \frac{\pi}{n} + \\
 &\quad + 2b^{kp} (1 + Y_1) \sin^2 \frac{\pi}{n}, \\
 f_1 &= \frac{2}{15} \mu^c \sin^2 \theta + 2\lambda_0 \mu^c \cos^2 \theta + \frac{1}{15} (4 - Y_1) \mu \cos^2 \frac{\pi}{n} + \\
 &\quad + 4(1 + Y_1) \mu \lambda_0 \sin^2 \frac{\pi}{n}, \\
 F_2 &= 4b^{c,t} + 4b^r (2 - Y_1) \sin^2 \frac{\pi}{n} + 2b^{kp} (1 - Y_1) \cos^2 \frac{\pi}{n}, \\
 f_2 &= \frac{2}{15} \mu^c + \frac{1}{15} (4 + Y_1) \mu \sin^2 \frac{\pi}{n} - 4(1 + Y_1) \mu \lambda_0 \cos^2 \frac{\pi}{n}, \\
 F_3 &= 4b^v (2 + Y_1) + 4b^{c,r} \cos^2 \theta + b^{c,kp} \sin^2 \theta, \\
 f_3 &= \frac{\mu}{15} (4 - Y_1) + \frac{\mu^c}{15} \cos^2 \theta + 2\mu \lambda_0 \sin^2 \theta, \\
 F_4 &= \frac{6}{(l^c)^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \left\{ (3 + Y_4 - 4Y_1) b^r \operatorname{ctg}^2 \theta + \frac{b^v}{\cos^2 \frac{\pi}{n}} \left[1 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + 2 \cos^2 \frac{\pi}{n} + Y_4 - 4Y_1 \left(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{n} \right) \right] + \frac{b^{c,t}}{\sin^2 \theta} (1 - Y_1) + \right. \\
 &\quad \left. + b^{c,r} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{n} (1 + Y_1) \right\},
 \end{aligned}
 \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 f_4 &= \frac{3}{5 (l^c)^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \left[\left(\frac{3}{2} + Y_4 - 4Y_1 \right) \mu \operatorname{ctg}^2 \theta + \left(1 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + 2 \cos^2 \frac{2\pi}{n} + Y_4 - 4Y_1 \cos \frac{2\pi}{n} \right) \frac{\mu}{\cos^2 \frac{\pi}{n}} + \right. \\
 &\quad \left. + (1 - 2Y_1) \frac{\mu^c}{\sin^2 \theta} + (1 + Y_1) \mu^c \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{n} \right], \\
 F_5 &= \frac{6b^r \operatorname{ctg} \theta}{l^c} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} (Y_2 - Y_3) - \frac{6b^{c,r} Y_3}{l^c} \frac{\sin \theta}{\cos \frac{\pi}{n}}, \\
 f_5 &= \frac{\mu \operatorname{ctg} \theta}{10 l^c} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} (Y_2 - Y_3) - \frac{\mu^c \sin \theta}{10 l^c \cos \frac{\pi}{n}} Y_3, \\
 F_6 &= \frac{6b^2 \operatorname{ctg} \theta}{l^c} (3X_3 - X_2) - \frac{6X_3 b^{c,t}}{l^c \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta}, \\
 f_6 &= \frac{\mu \operatorname{ctg} \theta}{10 l^c} (3X_3 - X_2) - \frac{\mu^c X_3}{10 l^c \sin \frac{\pi}{n} \sin \theta}, \\
 F_7 &= \frac{12 b^v}{l^c \sin \frac{2\pi}{n}} \left[Y_3 \left(2 \cos \frac{2\pi}{n} - 1 \right) - Y_2 \right] + \frac{6b^{c,r} Y_3}{l^c} \frac{\cos \theta}{\cos \frac{\pi}{n}}, \\
 f_7 &= \frac{\mu}{5 l^c \sin \frac{2\pi}{n}} \left[Y_3 \left(2 \cos \frac{2\pi}{n} - 1 \right) - Y_2 \right] + \frac{\mu^c \cos \theta}{10 l^c \cos \frac{\pi}{n}} Y_3,
 \end{aligned}
 \quad (16)$$

где:

- b^{kp} — погонная жесткость ригеля на кручение,
 $b^{c,kp}$ — погонная жесткость ребра на кручение,
 b^v — погонная жесткость ригеля на изгиб относительно вертикальной главной центральной оси его поперечного сечения,
 b^r — погонная жесткость ребра на изгиб относительно горизонтальной главной центральной оси его поперечного сечения,
 $b^{c,t}$ — погонная жесткость ребра на изгиб относительно горизонтальной главной центральной оси (перпендикулярной к радиусу системы) его поперечного сечения,
 $b^{c,r}$ — погонная жесткость ребра на изгиб относительно его второй главной центральной оси,
 l — длина ригеля,
 l^c — длина ребра,
 $\frac{N}{P}$ — отношение усилия в ригеле к внешней узловой нагрузке.

$\frac{N^e}{P}$ — отношение усилия в ребре к внешней узловой нагрузке,
 λ — коэффициент, зависящий от формы сечения ригеля,
 λ^e — коэффициент, зависящий от формы сечения ребра,

$$\mu = \frac{Nl}{P}, \mu^e = \frac{N^e l^e}{P}, \lambda_0 = \frac{\lambda}{l}, \lambda_0^e = \frac{\lambda^e}{(l^e)^2}.$$

Выполненные нами расчеты устойчивости четырехугольного и шестигульного купола [3] дали весьма хорошие результаты. По сравнению с точным расчетом мы получили завышенное значение критической нагрузки для четырехугольного купола на 1,2%, а для шестигульного на 0,97%. На эти расчеты по приближенному способу потребовалось 3 рабочих дня, а расчет по методу деформаций отнял 10 рабочих дней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов, т. II, 1946.
2. Бородянский М. Я. Приближенный способ расчета рам на устойчивость, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.
3. Бородянский М. Я. Опыты по устойчивости пространственных циклически-симметричных рам, Труды КТИПП им. Микояна, в. 11.

(Получена редакцией 1 февраля 1952 г.)

Доц. БОРОДЯНСКИЙ М. Я.,
кандидат технических наук

УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЕСТКО-ЗАЩЕМЛЕННЫХ ДВУХ- И ТРЕХПРОЛЕТНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ НАБОРОВ С УЧЕТОМ ЗАКРУЧИВАНИЯ СТЕРЖНЕЙ

(Кафедра сопротивления материалов и теоретической механики)

Вопросу устойчивости стержневых наборов посвящено много работ. Это объясняется практической потребностью изучения данного вопроса. Впервые задачу об устойчивости стержневых наборов поставил и частично решил Бубнов И. Г. [1]. Дальнейшим исследованием вопроса занимались Папкович П. Ф. [2], Пеньков А. М. [4] и др. авторы [5], [6].

Во всех известных работах, посвященных устойчивости стержневых наборов с жестко-защемленными концами, не учитывалось влияние крутильной жесткости стержней. Для ряда частных случаев наборов с шарнирным опиранием концов стержней исследовано влияние крутильной жесткости [5].

В предлагаемой работе рассматривается устойчивость некоторых жестко-защемленных стержневых наборов с учетом закручивания стержней.

Вывод формул для составления определителя критического состояния стержневого набора с любым количеством стержней

На рис. 1 показан стержневой набор. Стержни вертикального направления обозначены по порядку: $1, 2, 3 \dots i, i+1 \dots m$, а стержни горизонтального направления: $1, 2, 3 \dots k-1, k, k+1 \dots n$. Каждый узел, за исключением опорных, обладает четырьмя кинематически-независимыми неизвестными: тремя углами поворота $\varphi^r, \varphi^t, \varphi^v$ относительно переносных координатных осей r, t, v и одним линейным смещением δ из плоскости набора. Всего узлов (не считая опорных) в наборе, согласно нашей нумерации, $(m-1)(n-1)$, а определитель критического состояния должен получиться $4(m-1)(n-1)$ -го порядка.

Составим четыре уравнения упругости, характеризующие момент критического состояния для k, i -го узла. Для этого выделим k, i -тый узел (рис. 2) и приложим к нему появившиеся в узле (в общем виде) реактивные усилия, а именно: изгибающие моменты в двух плоскостях $M_1, M_2 \dots M_3$, крутящие моменты K_1, K_2, K_3, K_4 и перерезывающие силы в двух плоскостях $Q_1, Q_2 \dots Q_3$.

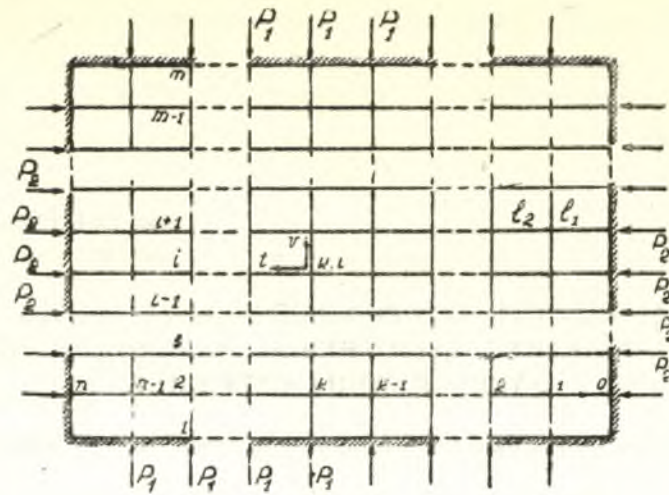


Рис. 1.

Четыре типовых уравнения упругости имеют вид (рис. 2):

$$\Sigma M_r = 0; \quad -(M_5 + M_6 + M_7 + M_8) = 0, \quad (1)$$

$$\Sigma M_t = 0; \quad -M_3 - M_4 + K_1 + K_2 = 0, \quad (2)$$

$$\Sigma M_v = 0; \quad -(M_1 + M_2 + K_3 + K_4) = 0, \quad (3)$$

$$\Sigma Q_r = 0; \quad Q_1 - Q_2 - Q_3 + Q_4 = 0. \quad (4)$$

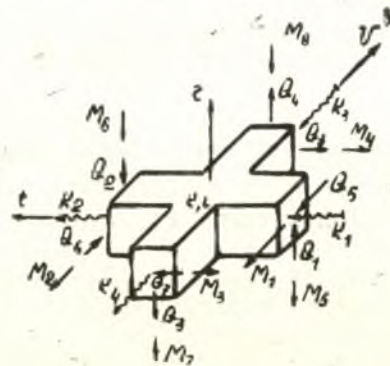


Рис. 2.

Теперь можно воспользоваться известными зависимостями из метода деформации [3] между конечными перемещениями и усилиями сжатого стержня в момент критического состояния. Для этого удобнее выделить стержни, сходящиеся в k, i -том узле, написать значения всех реактивных величин, входящих в уравнения (1—4) и выделить коэффициенты при одноименных неизвестных деформациях. После этого получим четыре типовых уравнения k, i -го узла. Опуская элементарные выкладки, заметим, что уравнение (1) не зависит от остальных трех уравнений (2), (3) и (4), т. е. общая потеря устойчивости набора распадается на потерю устойчивости в плоскости набора (1) и на потерю устойчивости из его плоскости (2—4).

При потере устойчивости в плоскости набора типовые уравнения k, i -го узла выражаются в следующем виде:

$$A\varphi_{k,i}^r + B(\varphi_{k-1,i}^r + \varphi_{k+1,i}^r) + B'(\varphi_{k,i-1}^r + \varphi_{k,i+1}^r) = 0, \quad (5)$$

где:

$$A = 2b_2^r \alpha_2^r + 2b_1^r \alpha_1^r; \quad B = b_2^r \beta_2^r; \quad B' = b_1^r \beta_1^r; \quad (6)$$

b_1^r, b_2^r — изгибные погонные жесткости стержней вертикального и горизонтального направлений относительно центральных осей параллельных оси r (рис. 2);

$\alpha_1^r, \alpha_2^r, \beta_1^r, \beta_2^r$ — соответствующие функции из [3].

Типовые уравнения упругости, характеризующие потерю устойчивости из плоскости набора рационально записать в табличном виде:

φ^t			φ^v			δ		
$i-1$	i	$i+1$	$i-1$	i	$i+1$	$i-1$	i	$i+1$
$\varphi_{k,i-1}^t$	$\varphi_{k-1,i}^t$	$\varphi_{k,i}^t$	$\varphi_{k+1,i}^t$	$\varphi_{k,i+1}^t$	$\varphi_{k,i-1}^v$	$\varphi_{k-1,i}^v$	$\varphi_{k,i}^v$	$\varphi_{k+1,i}^v$
B_1	B_2	A_1	B_1	B_1				
					B_2	B_2	A_2	B_2
$-C_1$			C_1		$-C_2$	C_2	L_1	L_2
							Γ	L_2
								L_1

где:

$$A_1 = 2b_1 \alpha_1 + b_2^{kp}; \quad B_1 = -0,5b_2^{kp}; \quad B_1' = b_1 \beta_1; \\ A_2 = 2b_2 \alpha_2 + b_1^{kp}; \quad B_2 = -0,5b_1^{kp}; \quad B_2' = b_2 \beta_2; \\ \Gamma = \frac{2b_2 \gamma_2}{l_2^2} + \frac{2b_1 \gamma_1}{l_1^2}; \quad L_1 = -\frac{b_1 \gamma_1}{l_1^2}; \quad L_2 = -\frac{b_2 \gamma_2}{l_2^2}; \\ C_1 = \frac{b_1}{l_1} (\alpha + \beta)_1; \quad C_2 = \frac{b_2}{l_2} (\alpha + \beta)_2; \quad (8)$$

l_1, l_2 — длины стержней (расстояния между соседними узлами) вертикального и горизонтального направлений (рис. 1);

b_1, b_2 — изгибные погонные жесткости стержней из плоскости набора вертикального и горизонтального направлений;

b_1^{kp}, b_2^{kp} — погонные жесткости стержней вертикального и горизонтального направлений на кручение;

$\alpha_1, \beta_2, \gamma_1, \dots$ — соответствующие функции из [3].

По формуле (7) нетрудно составить определитель критического состояния стержневого набора из mn стержней, где m и n — любые целые числа. Для этого удобно заготовить таблицу из $3(m-1)(n-1)$ клеток и, меняя индекс k от 1 до $n-1$, а индекс i от 1 до $m-1$, вставить коэффициенты A, B, B', \dots из (7) в соответствующие клетки.

Приравненный нулю определитель дает условие в виде трансцендентного уравнения $3(m-1)(n-1)$ -го порядка для определения критической нагрузки. Однако порядок этого определителя весьма высок и практически, обычным путем, его раскрыть нельзя. Перейдем к рассмотрению отдельных задач, где покажем способы разложения определителя критического состояния и выведем сравнительно простые формулы (для определения критических нагрузок), каждая из которых будет дана в виде определителя не выше третьего порядка.

Вывод формул для расчета устойчивости двух- и трехпролетных стержневых наборов

Предварительно условимся относительно обозначений операций с парами столбцов или строк определителя критического состояния.

Рассмотрим пару смежных столбцов (9) определителя критического состояния и присвоим им названия a и b . Пусть элементы этих столбцов, например, будут:

$$\begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} a & b \end{matrix}}^{\Pi_1} & \\ \dots & \begin{matrix} A & B \\ B & A \\ B & \Gamma \\ M & B \end{matrix} & \dots \end{matrix} \quad (9)$$

Теперь к элементам столбца a прибавим элементы столбца b и запишем их вместо элементов столбца a . Разность элементов a и b запишем вместо элементов столбца b , т. е. вместо (9) получим:

$$\begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} a+b & a-b \end{matrix}}^{\Pi_1} & \\ \dots & \begin{matrix} A+B & A-B \\ B+A & B-A \\ B+\Gamma & B-\Gamma \\ M+B & M-B \end{matrix} & \dots \end{matrix} \quad (10)$$

Такого вида операцию обозначим Π_1 , а фигурная скобка ниже (правее) Π_1 будет указывать, к какой паре столбцов (строк) эта операция относится.

Аналогично, если мы в (9) вместо элементов столбца a запишем разность элементов столбцов a и b , а их сумму вместо элементов столбца b , т. е. поменяем в (10) столбцы местами, то такую операцию назовем Π_2 .

Рассмотрим ряд частных случаев наборов:

1. $m=2, n=2$ (рис. 3). Определитель критического состояния будет третьего порядка и согласно (7) запишется (все не обозначенные элементы равны нулю):

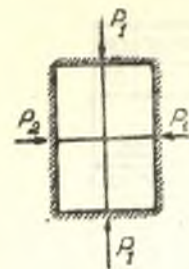


Рис. 3.

$$\begin{vmatrix} A_1 & & \\ & A_2 & \\ & & \Gamma \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

т. е. без каких-либо преобразований можно (11) записать так:

$$A_1 = 0; A_2 = 0; \Gamma = 0. \quad (12)$$

2. $m=2, n=3$ (рис. 4). Определитель критического состояния будет шестого порядка и по (7) запишется в виде:

$$\begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} \Pi_1 & \Pi_1 & \Pi_1 \end{matrix}} & \\ \dots & \begin{matrix} \begin{matrix} A_1 & B_1 \\ B_1 & A_1 \end{matrix} & & \\ & & \begin{matrix} A_2 & B_2 \\ B_2 & A_2 \end{matrix} & \\ & & & \begin{matrix} \Gamma & L_2 \\ L_2 & \Gamma \end{matrix} \end{matrix} & \dots \end{matrix} = 0. \quad (13)$$

После преобразований столбцов (строк) этого определителя, согласно Π_1 он примет диагональный вид, т. е. его можно будет представить в виде ряда простых формул, по которым весьма просто определить критические нагрузки:

$$\begin{matrix} A_1 - B_1 = 0; & A_1 + B_1 = 0; & A_2 + B_2 = 0; \\ A_2 - B_2 = 0; & \Gamma + L_2 = 0; & \Gamma - L_2 = 0. \end{matrix} \quad (14)$$

Проделав операция с элементами (13) согласно Π_1 , мы, очевидно, умножили определитель критического состояния на число, отличное от нуля. Но так как для определения критической нагрузки необходимо определить, составленный по (7), приравнять нулю, то умножение его на число, отличное от нуля, не отражается на величину критической нагрузки.

3. $m=3, n=3$ (рис. 5). В данном случае определитель критического состояния будет двенадцатого порядка. Определитель обведен в таблице двойными линиями, столбцы и строки пронумерованы от 1 до 12.

Над столбцами определителя (см. таблицу) и впереди его строк указаны те операции, которые необходимо проделать со столбцами (строками) определителя, чтобы он принял квазидиагональный вид.

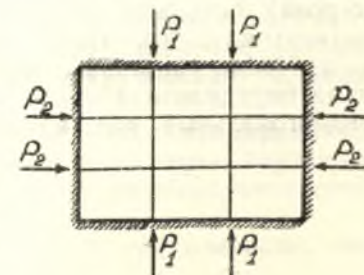


Рис. 5.

VII											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4	7	10	2	5	8	11	3	6	9	12
V											
Π ₁			Π ₁			Π ₂			Π ₂		
III											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	5	7	9	11	2	4	6	8	10	12
I											
Π ₁			Π ₂			Π ₁			Π ₁		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	Π ₁	1	1	Π ₁	1	A ₁ B ₁			B ₁	-C ₁
2	4	Π ₁	2	3	Π ₁	2	B ₁ A ₁			B ₁	-C ₁
3	7	Π ₁	3	5	Π ₂	3		A ₂ B ₂	-C ₂		B ₂
4	10	Π ₁	4	7	Π ₂	4		B ₂ A ₂ C ₂			B ₂
5	2	Π ₂	5	9	Π ₁	5		C ₂ Γ	Λ ₂ C ₁		Λ ₁
6	5	Π ₂	6	11	Π ₁	6		-C ₂	Λ ₂ Γ	C ₁	Λ ₁
7	8	Π ₂	7	2	Π ₁	7	B ₁		C ₁	A ₁ B ₁	
8	11	Π ₂	8	4	Π ₁	8	B ₁		C ₁ B ₁ A ₁		
9	3	Π ₂	9	6	Π ₂	9		B ₂		A ₂ B ₂	-C ₂
10	6	Π ₂	10	8	Π ₂	10		B ₂		B ₂ A ₂ C ₂	
11	9	Π ₂	11	10	Π ₁	11	-C ₁		Λ ₁	C ₂ Γ	Λ ₂
12	12	Π ₂	12	12	Π ₁	12	-C ₁		Λ ₁	-C ₂	Λ ₂ Γ

Поясним эти преобразования. Операция I (II) указывает, что необходимо преобразовать пары столбцов (строк) согласно Π₁, Π₂. После этого необходимо переставить местами столбцы (строки) преобразованного определителя согласно III (IV). Например, первый столбец (строка) остается на своем месте, второй столбец (строка) должен занять третье место, третий столбец (строка) пятое место и т. д. После перестановки столбцов (строк) нужно проделать операции со столбцами (строками), согласно V (VI) и переставить столбцы (строки) в таком порядке, как это указано в VII (VIII), т. е. первый столбец (строка) останется на своем месте, второй столбец (строка) займет четвертое место, третий столбец (строка) займет седьмое место и т. д. После указанных преобразований I—VIII со столбцами и строками определителя критического состояния, определитель примет квазидиагональный вид, который можно схематически так представить:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline (16) & & & \text{нули} \\ \hline & (17) & & \\ \hline & & (18) & \\ \hline \text{нули} & & & (19) \\ \hline \end{array} = 0 \quad (15)$$

Теперь можно раскрытие определителя критического состояния двенадцатого порядка (15) заменить раскрытием четырех определителей (16—19), каждый из которых третьего порядка:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1+B_1+B_1 & & C_1 \\ \hline & A_2-B_2-B_2 & -C_2 \\ \hline C_1 & -C_2 & \Gamma-L_1+L_2 \\ \hline \end{array} = 0, \quad (16)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1+B_1-B_1 & & -C_1 \\ \hline & A_2+B_2-B_2 & -C_2 \\ \hline -C_1 & -C_2 & \Gamma+L_1+L_2 \\ \hline \end{array} = 0, \quad (17)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1-B_1+B_1 & & -C_1 \\ \hline & A_2-B_2+B_2 & -C_2 \\ \hline -C_1 & -C_2 & \Gamma-L_1-L_2 \\ \hline \end{array} = 0, \quad (18)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1--B_1-B_1 & & -C_1 \\ \hline & A_2+B_2+B_2 & C_2 \\ \hline -C_1 & C_2 & \Gamma+L_1-L_2 \\ \hline \end{array} = 0. \quad (19)$$

Определители (16—19) дают четыре условия в виде четырех независимых друг от друга трехчленных трансцендентных кубических уравнений для определения критической нагрузки. Так как в общем виде решить трансцендентные уравнения не удается, то нетрудно для каждой задачи при помощи таблиц функций α, β, γ [3] и нескольких последовательных попыток найти по критериям (12), (14), (16—19) корни, характеризующие критические нагрузки. Наименьший из всех корней для каждого данного случая определяет наименьшую, т. е. практически реальную критическую нагрузку.

Естественно теперь оценить влияние крутильной жесткости на величину критического груза. Для этого достаточно сначала определить критическую нагрузку по полученным нами формулам, а после принять в этих формулах $b^{cp}=0$, или воспользоваться результатами [6], т. е. найти критическую нагрузку без учета влияния крутильной жесткости и сравнить полученные результаты.

Произведенный ряд численных расчетов устойчивости наборов, состоящих из стержней с часто встречающимися профилями, не показали существенных различий в критических нагрузках при учете и без учета крутильных жесткостей. Учет закручивания стержней в рассмотренных примерах давал преуменьшенное значение критической нагрузки (по сравнению с учетом закручивания) не более чем на 1%.

Таким образом, можно полагать, что для двух-трехпролетных наборов из стержней нормального профиля (швеллеры, двутавры), ради упрощения расчета, не стоит учитывать крутильных жесткостей стержней.

Для наборов с большим количеством пролетов, очевидно, требуется дополнительное исследование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бубнов И. Г. Строительная механика корабля. 1912.
2. Папкович П. Ф. Строительная механика корабля, ч. II, 1941.
3. Корнюхов Н. В. Прочность и устойчивость стержневых систем, 1949.

4. Пеньков А. М. Устойчивость стержневых наборов, Труды КТИПП им. Микояна, в. 6.

5. Рудоминский Э. В. К вопросу об устойчивости стержневых наборов с учетом закручивания стержней, Труды КТИПП им. Микояна, в. 8 и 10.

6. Венцель Н. А. Устойчивость плоских стержневых наборов с жестким закреплением по контуру. Сборник трудов Института строительной механики АН УССР, № 15, 1951.

(Получена редакцией 10 апреля 1952 г.)

Док. ОСИПОВ П. Н.
кандидат технических наук

О ПРИМЕНЕНИИ ПРЯМОГО МЕТОДА ТЕНЗОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

(Кафедра математики)

Прямым методом мы называем такой, при котором операции выполняются не над координатами $t_{\alpha\lambda}$ векторного тензора $T = t_{\alpha\lambda} i_{\alpha} i_{\lambda}$, а над его компонентами $t_{\alpha\lambda} i_{\alpha} i_{\lambda}$ ($\alpha, \lambda = 1, 2, 3$).

Применение прямого метода значительно упрощает операции и делает их наглядными. Это особенно ясно видно из доказанной нами теоремы о преобразовании координат векторного тензора.

Преобразование координат тензора

а) Первый способ.

Рассмотрим преобразование координат тензора при переходе от одного ортогонального координатного триэдра i_1, i_2, i_3 к другому ортогональному триэдру i'_1, i'_2, i'_3 , имеющим общее начало. Так как координаты тензора зависят от выбранного нами координатного триэдра, то при переходе от одного координатного триэдра к другому координаты одного и того же тензора будут меняться. Получим эти формулы преобразования координат, отправляясь от девятичленной формы тензора

$$T = t_{11} i_1 i_1 + t_{12} i_1 i_2 + t_{13} i_1 i_3 + \\ + t_{21} i_2 i_1 + t_{22} i_2 i_2 + t_{23} i_2 i_3 + \\ + t_{31} i_3 i_1 + t_{32} i_3 i_2 + t_{33} i_3 i_3. \quad (1)$$

Или, пользуясь условием Эйнштейна (произведения, в которых греческий индекс встречается два раза, суммируются по этому индексу без знака суммы), эту девятичленную форму мы можем записать короче:

$$T = t_{\alpha\lambda} i_{\alpha} i_{\lambda}. \quad (2)$$

Далее, обозначая косинусы углов между координатными ортами буквой α с соответствующими индексами (см. таблицу), напишем разложения старых координатных ортов i_1, i_2, i_3 по новым ортам i'_1, i'_2, i'_3 :

	i_1	i_2	i_3
i'_1	α_{11}	α_{12}	α_{13}
i'_2	α_{21}	α_{22}	α_{23}
i'_3	α_{31}	α_{32}	α_{33}

$$i_1 = \alpha_{11} i'_1 + \alpha_{21} i'_2 + \alpha_{31} i'_3 \\ i_2 = \alpha_{12} i'_1 + \alpha_{22} i'_2 + \alpha_{32} i'_3 \\ i_3 = \alpha_{13} i'_1 + \alpha_{23} i'_2 + \alpha_{33} i'_3 \quad (3)$$

или короче:

$$i_x = \alpha_{\mu x} i'_\mu \quad (x, \mu = 1, 2, 3). \quad (3')$$

Аналогичные разложения напишутся и для правых координатных ортов i_λ в диадных произведениях (2):

$$i_\lambda = \alpha_{\lambda \nu} i'_\nu \quad (4)$$

Подставляя из (3') и (4) во (2), получим тензор T' , отнесенный к триэдру i'_1, i'_2, i'_3 :

$$T' = t'_{\mu\nu} \alpha_{\mu x} \alpha_{\lambda \nu} i'_\mu i'_\nu \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что координаты вновь полученного тензора имеют вид:

$$t'_{\mu\nu} = t_{\lambda\lambda} \alpha_{\mu x} \alpha_{\lambda \nu} \quad (6)$$

или в более подробной записи:

$$t'_{\mu\nu} = \left. \begin{aligned} & t_{11} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 1} + t_{12} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 2} + t_{13} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 3} + \\ & + t_{21} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 1} + t_{22} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 2} + t_{23} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 3} + \\ & + t_{31} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 1} + t_{32} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 2} + t_{33} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 3} \end{aligned} \right\} (\mu, \nu = 1, 2, 3) \quad (6')$$

Из формулы (6'), давая μ и ν значения последовательно равные 1, 2, 3, получим все девять координат $t'_{11}, t'_{12}, \dots, t'_{33}$ нового тензора T' .

б) Второй способ.

В основе второго способа лежит следующая теорема:

Векторный тензор $T = t_{\lambda\lambda} i_\lambda i_\lambda$, отнесенный к ортогональному триэдру i_x ($x = 1, 2, 3$), при переходе к новому ортогональному триэдру i'_x будет иметь координаты $t'_{\lambda\lambda}$ такие же, как и векторный тензор $Q = A \cdot T \cdot A^c$, отнесенный к старому триэдру i_x . Здесь A — тензор, координатами которого являются косинусы углов между ортвекторами обоих триэдров (см. таблицу), а A^c — сопряженный с A тензор.

Для доказательства теоремы напишем девятичленные формы тензоров A, T и A^c :

$$A = \alpha_{\mu x} i_\mu i_x, \quad T = t_{\lambda\lambda} i_\lambda i_\lambda, \quad A^c = \alpha_{\lambda \nu} i_\lambda i_\nu$$

и подставляя их в выражение для Q , получим

$$Q = t_{\lambda\lambda} \alpha_{\mu x} \alpha_{\lambda \nu} i_\mu i_x \cdot i_\lambda i_\lambda \cdot i_\lambda i_\nu \quad (7)$$

Из выражения (7) с предельной ясностью видно, что орты, вступающие в скалярные произведения, будучи ортогональными, дадут нули, скалярные же произведения одноименных ортов дадут единицу; следовательно, останется такая девятичленная сумма:

$$Q = t_{\lambda\lambda} \alpha_{\mu x} \alpha_{\lambda \nu} i_\mu i_\nu \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что тензор Q имеет координаты:

$$q_{\mu\nu} = t_{\lambda\lambda} \alpha_{\mu x} \alpha_{\lambda \nu} \quad (9')$$

Сравнивая выражения (6) и (9), видим, что они совпадают, это и доказывает теорему.

Примечание.

1. Чтобы при перемножении в (7) различать индексы сомножителей, взяты разные буквы для индексов в выражениях A и A^c .

2. В развернутом виде тензоры A и A^c имеют следующий вид:

$$A = \begin{cases} \alpha_{11} i_1 i_1 + \alpha_{12} i_1 i_2 + \alpha_{13} i_1 i_3 + \\ + \alpha_{21} i_2 i_1 + \alpha_{22} i_2 i_2 + \alpha_{23} i_2 i_3 + \\ + \alpha_{31} i_3 i_1 + \alpha_{32} i_3 i_2 + \alpha_{33} i_3 i_3 \end{cases} \quad A = \begin{cases} \alpha_{11} i_1 i_1 + \alpha_{21} i_1 i_2 + \alpha_{31} i_1 i_3 + \\ + \alpha_{12} i_2 i_1 + \alpha_{22} i_2 i_2 + \alpha_{32} i_2 i_3 + \\ + \alpha_{13} i_3 i_1 + \alpha_{23} i_3 i_2 + \alpha_{33} i_3 i_3 \end{cases}$$

Тензор напряжений

Для получения тензора напряжений вырежем мысленно внутри упругого тела бесконечно малый тетраэдр $MABC$ при точке M (рис. 1).

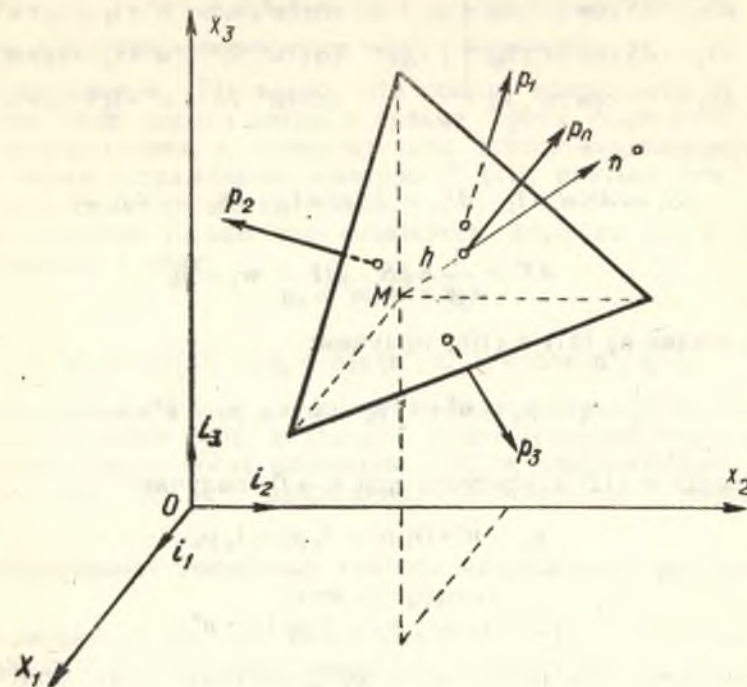


Рис. 1.

Обозначения:

- ρ — плотность,
- dV — объем бесконечно малого тетраэдра $MABC$,
- F — внешняя объемная сила, действующая на единицу массы тетраэдра,
- w — ускорение точки тетраэдра,
- P_n, P_1, P_2, P_3 — вектора напряжений, действующих на гранях, соответственно ABC, MBC, MAC, MAB ,
- h — высота тетраэдра,
- dS, dS_1, dS_2, dS_3 — площади граней ABC, MBC, MAC, MAB ,
- n — внешняя нормаль к грани ABC .

Силы, действующие на выделенный в упругом теле бесконечно малый тетраэдр $MABC$:

$\rho F dV$ — внешняя объемная сила, действующая на весь выделенный тетраэдр,

$-\rho w dV$ — сила инерции, где ρdV — масса объема,

$P_n dS, -P_1 dS_1, -P_2 dS_2, -P_3 dS_3$ — поверхностные силы, соответственно на гранях ABC, MBC, MAC, MAB тетраэдра $MABC$.

При ускоренном движении тетраэдра $MABC$ внешние силы $\rho F dV$, $p_n dS$, $-p_1 dS_1 - p_2 dS_2 - p_3 dS_3$ и сила инерции $-\rho w dV$, приложенные к нему, по началу Даламбера, дадут векторную сумму, равную нулю, т. е.

$$\rho(F - w) dV + p_n dS - p_1 dS_1 - p_2 dS_2 - p_3 dS_3 = 0, \quad (10)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} dS_1 &= dS \cos(n^\circ, i_1) \\ dS_2 &= dS \cos(n^\circ, i_2) \\ dS_3 &= dS \cos(n^\circ, i_3) \end{aligned} \right\}, \text{ где: } \begin{aligned} \cos(n^\circ, i_1) &= n^\circ \cdot i_1 = i_1 \cdot n^\circ \\ \cos(n^\circ, i_2) &= n^\circ \cdot i_2 = i_2 \cdot n^\circ \\ \cos(n^\circ, i_3) &= n^\circ \cdot i_3 = i_3 \cdot n^\circ \end{aligned} *$$

следовательно

$$dS_1 = dS n^\circ \cdot i_1, \quad dS_2 = dS n^\circ \cdot i_2, \quad dS_3 = dS n^\circ \cdot i_3$$

и

$$dV = \frac{1}{3} h dS, \quad \rho(F - w) = q. \quad (11)$$

Подставляя из (11) в (10), получим:

$$\frac{1}{3} h q + p_n = n^\circ \cdot i_1 p_1 + n^\circ \cdot i_2 p_2 + n^\circ \cdot i_3 p_3. \quad (12)$$

Переходя в (12) к пределу, при $h \rightarrow 0$, получим:

$$p_n = n^\circ \cdot (i_1 p_1 + i_2 p_2 + i_3 p_3) \quad (13)$$

или

$$p_n = (p_1 i_1 + p_2 i_2 + p_3 i_3) \cdot n^\circ \quad (14)$$

Разлагая векторы p_1 , p_2 , p_3 по координатным ортам, получим:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{11} i_1 + p_{12} i_2 + p_{13} i_3, \\ p_2 &= p_{21} i_1 + p_{22} i_2 + p_{23} i_3, \\ p_3 &= p_{31} i_1 + p_{32} i_2 + p_{33} i_3. \end{aligned} \quad (15)$$

и подставляя в (13):

$$\begin{aligned} p_n &= n^\circ \cdot (p_{11} i_1 i_1 + p_{12} i_1 i_2 + p_{13} i_1 i_3 + \\ &+ p_{21} i_2 i_1 + p_{22} i_2 i_2 + p_{23} i_2 i_3 + \\ &+ p_{31} i_3 i_1 + p_{32} i_3 i_2 + p_{33} i_3 i_3), \end{aligned} \quad (16)$$

где в скобках стоит тензор напряжений в девятичленной форме; обозначая его через P , запишем в свернутой форме:

$$P = p_{\lambda\lambda} i_\lambda i_\lambda. \quad (17)$$

($\lambda = 1, 2, 3$)

В силу закона парности касательных напряжений, в (16):

$$p_{12} = p_{21}, \quad p_{13} = p_{31}, \quad p_{23} = p_{32} \quad (18)$$

девятичленная форма (17) тензора напряжений примет вид:

$$P = p_{11} i_1 i_1 + p_{22} i_2 i_2 + p_{33} i_3 i_3 + p_{12} (i_1 i_2 + i_2 i_1) + p_{23} (i_2 i_3 + i_3 i_2) + p_{31} (i_3 i_1 + i_1 i_3). \quad (19)$$

Примечание. Подставляя из (15) в (14), получим

$$\begin{aligned} p_n &= (p_{11} i_1 i_1 + p_{21} i_1 i_2 + p_{31} i_1 i_3 + \\ &+ p_{12} i_2 i_1 + p_{22} i_2 i_2 + p_{32} i_2 i_3 + \\ &+ p_{13} i_3 i_1 + p_{23} i_2 i_2 + p_{33} i_3 i_3) \cdot n^\circ = P^\circ \cdot n^\circ, \end{aligned} \quad (20)$$

где $P^\circ = p_{\lambda\lambda} i_\lambda i_\lambda$ — сопряженный тензор упругих напряжений.

Из выражения (19) видно, что тензор напряжений P не изменяется при перестановке левых и правых ортов сомножителей в диадных произведениях, а, следовательно, тензор напряжения P совпадает со своим сопряженным тензором P° (21); поэтому тензор напряжений есть симметрический тензор.

На основании только что сказанного, формулы (13) и (14) могут быть записаны в виде

$$p_n = p_{\lambda\lambda} n^\circ \cdot i_\lambda i_\lambda, \quad (22)$$

где

$$n^\circ = \cos(n^\circ, i_1) i_1 + \cos(n^\circ, i_2) i_2 + \cos(n^\circ, i_3) i_3.$$

Из формулы (22) видно, что при поворачивании ортвектора n° наклонной площадки ABC тетраэдра будет поворачиваться и перпендикулярная к нему косая площадка ABC , а, следовательно, формула (22) дает весь „ёжик“ напряжений в точке M с координатами x, y, z .

Преобразование координат тензора напряжений при повороте осей координат

В повернутой системе координат $0 x'_1, x'_2, x'_3$ координаты тензора напряжений (17) будут выражаться формулой (6')

$$\begin{aligned} p'_{\mu\nu} &= p_{11} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 1} + p_{12} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 2} + p_{13} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 3} + \\ &+ p_{21} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 1} + p_{22} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 2} + p_{23} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 3} + \\ &+ p_{31} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 1} + p_{32} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 2} + p_{33} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 3}. \end{aligned} \quad (23)$$

или по (18):

$$\begin{aligned} p'_{\mu\nu} &= p_{11} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 1} + p_{22} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 2} + p_{33} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 3} + p_{12} (\alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 2} + \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 1}) + \\ &+ p_{23} (\alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 3} + \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 2}) + p_{31} (\alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 1} + \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 3}). \end{aligned} \quad (24)$$

Придавая в (24) индексам μ и ν значения, равные 1, 2, 3, получим все шесть координат $p'_{11}, p'_{22}, p'_{33}, p'_{12}, p'_{23}, p'_{31}$ тензора относительно нового триэдра i'_1, i'_2, i'_3 :

$$\begin{aligned} p'_{11} &= p_{11} \alpha_{11}^2 + p_{22} \alpha_{12}^2 + p_{33} \alpha_{13}^2 + 2p_{12} \alpha_{11} \alpha_{12} + 2p_{23} \alpha_{12} \alpha_{13} + 2p_{31} \alpha_{13} \alpha_{11}, \\ p'_{22} &= p_{11} \alpha_{21}^2 + p_{22} \alpha_{22}^2 + p_{33} \alpha_{23}^2 + 2p_{12} \alpha_{21} \alpha_{22} + 2p_{23} \alpha_{22} \alpha_{23} + 2p_{31} \alpha_{23} \alpha_{21}, \\ p'_{33} &= p_{11} \alpha_{31}^2 + p_{22} \alpha_{32}^2 + p_{33} \alpha_{33}^2 + 2p_{12} \alpha_{31} \alpha_{32} + 2p_{23} \alpha_{32} \alpha_{33} + 2p_{31} \alpha_{33} \alpha_{31}, \\ p'_{12} &= p_{11} \alpha_{11} \alpha_{21} + p_{22} \alpha_{12} \alpha_{22} + p_{33} \alpha_{13} \alpha_{23} + p_{12} (\alpha_{11} \alpha_{22} + \alpha_{12} \alpha_{21}) + \\ &+ p_{23} (\alpha_{12} \alpha_{23} + \alpha_{13} \alpha_{22}) + p_{31} (\alpha_{13} \alpha_{21} + \alpha_{11} \alpha_{23}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p'_{23} &= p_{11} \alpha_{21} \alpha_{31} + p_{22} \alpha_{22} \alpha_{32} + p_{33} \alpha_{23} \alpha_{33} + p_{12} (\alpha_{21} \alpha_{32} + \alpha_{22} \alpha_{31}) + \\
 &\quad + p_{23} (\alpha_{22} \alpha_{33} + \alpha_{23} \alpha_{32}) + p_{31} (\alpha_{23} \alpha_{31} + \alpha_{21} \alpha_{33}), \\
 p'_{31} &= p_{11} \alpha_{31} \alpha_{11} + p_{22} \alpha_{32} \alpha_{12} + p_{33} \alpha_{33} \alpha_{13} + p_{12} (\alpha_{31} \alpha_{12} + \alpha_{32} \alpha_{11}) + \\
 &\quad + p_{23} (\alpha_{32} \alpha_{13} + \alpha_{33} \alpha_{12}) + p_{31} (\alpha_{33} \alpha_{11} + \alpha_{31} \alpha_{13}).
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Если сравнить формулы (25) с формулами (1), приведенными в книге Мусхелишвили Н. И.¹, то надо положить: $p_{11} = X_x$, $p_{22} = Y_y$,

$$p_{33} = Z_z, \quad p_{12} = X_y, \quad p_{23} = Y_z, \quad p_{31} = Z_x, \quad p'_{11} = X'_x, \quad p'_{22} = Y'_y,$$

$$p'_{33} = Z'_z, \quad p'_{12} = X'_y, \quad p'_{23} = Y'_z, \quad p'_{31} = Z'_x.$$

Тензор бесконечно малых деформаций

Для получения тензора бесконечно малых деформаций найдем производную вектора перемещения по направлению, определяемому единичным вектором S° .

Пусть имеем векторное поле вектора перемещения

$$q = q(r) = q(x, y, z) \tag{26}$$

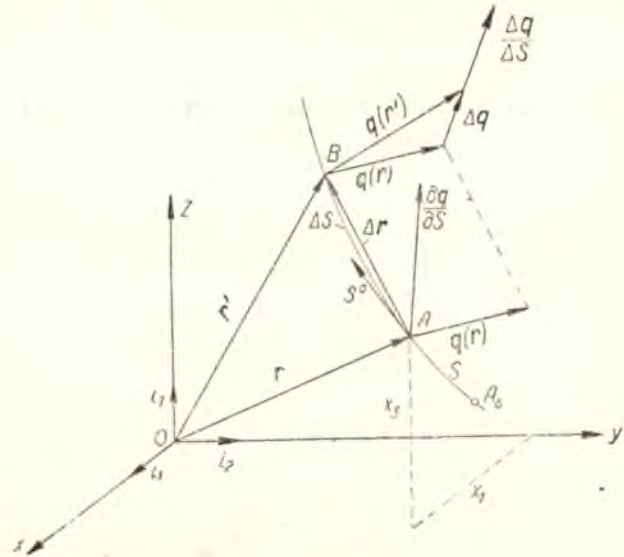


Рис. 2.

Составим отношение приращения $q(r') - q(r)$, непрерывной в окрестности точки A вектор-функции $q(r)$, к ΔS .

¹ Для более подробного ознакомления с тензором напряжений отсылаем к литературе [1-4].

$$\frac{q(r') - q(r)}{\Delta S}$$

и предполагая, что предел этого отношения существует, получим производную вектора перемещения q по направлению S в рассматриваемой точке A :

$$\frac{\partial q}{\partial S} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{q(r') - q(r)}{\Delta S}.$$

Так как вектор-функция (26) есть сложная функция от S через посредство x, y, z , то, применяя правило дифференцирования сложных функций, получим:

$$\frac{\partial q}{\partial S} = \frac{\partial q}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dS} + \frac{\partial q}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dS} + \frac{\partial q}{\partial x_3} \frac{dx_3}{dS}, \tag{27}$$

где

$$\frac{dx_1}{dS} = \cos(S^\circ, i_1) = S^\circ \cdot i_1,$$

$$\frac{dx_2}{dS} = \cos(S^\circ, i_2) = S^\circ \cdot i_2,$$

$$\frac{dx_3}{dS} = \cos(S^\circ, i_3) = S^\circ \cdot i_3.$$

Следовательно, (27) можно записать так:

$$\frac{\partial q}{\partial S} = S^\circ \cdot \left(i_1 \frac{\partial q}{\partial x_1} + i_2 \frac{\partial q}{\partial x_2} + i_3 \frac{\partial q}{\partial x_3} \right). \tag{28}$$

Выражение, стоящее в скобках формулы (28), есть тензор бесконечно малых искажений:

$$D = i_1 \frac{\partial q}{\partial x_1} + i_2 \frac{\partial q}{\partial x_2} + i_3 \frac{\partial q}{\partial x_3}. \tag{29}$$

Составим девятичленную форму тензора искажений. Для этого разложим вектор перемещений q по координатным ортам:

$$q = U_1 i_1 + U_2 i_2 + U_3 i_3. \tag{30}$$

Тогда в (29):

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial q}{\partial x_1} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_1} i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} i_3 \\
 \frac{\partial q}{\partial x_2} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_2} i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} i_3 \\
 \frac{\partial q}{\partial x_3} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_3} i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} i_3
 \end{aligned} \right\} \tag{31}$$

Следовательно, (29) примет вид:

$$D = \frac{\partial U_1}{\partial x_1} i_1 i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} i_1 i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} i_1 i_3 + \\ + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} i_2 i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} i_2 i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} i_2 i_3 + \\ + \frac{\partial U_1}{\partial x_3} i_3 i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} i_3 i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} i_3 i_3 \quad (32)$$

или (32) в свернутом виде запишется так:

$$D = \frac{\partial U_\lambda}{\partial x_\lambda} i_\lambda i_\lambda, \quad (\lambda = 1, 2, 3) \quad (33)$$

По (29) и (33) формула (28) примет вид:

$$\frac{\partial q}{\partial S} = S \cdot D = S \cdot \frac{\partial U_\lambda}{\partial x_\lambda} i_\lambda i_\lambda. \quad (34)$$

Разложим тензор искажения D на сумму двух тензоров: симметричного $D_c = \frac{D + \bar{D}}{2}$ и антисимметричного $D_a = \frac{D - \bar{D}}{2}$, где \bar{D} — тензор, сопряженный с тензором D .

По (32):

$$\bar{D} = \frac{\partial U_1}{\partial x_1} i_1 i_1 + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} i_1 i_2 + \frac{\partial U_1}{\partial x_3} i_1 i_3 + \\ + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} i_2 i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} i_2 i_2 + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} i_2 i_3 + \\ + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} i_3 i_1 + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} i_3 i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} i_3 i_3 \quad (35)$$

или в свернутом виде:

$$D = \frac{\partial U_\lambda}{\partial x_\lambda} i_\lambda i_\lambda. \quad (35')$$

Следовательно:

$$D_c = \frac{D + \bar{D}}{2} = \frac{\partial U_1}{\partial x_1} i_1 i_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right) i_1 i_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \right) i_1 i_3 + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right) i_2 i_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} i_2 i_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \right) i_2 i_3 + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \right) i_3 i_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} \right) i_3 i_2 + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} i_3 i_3. \quad (36)$$

Обозначим здесь:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \right) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial U_2}{\partial x_2}, \quad \varepsilon_{31} = \varepsilon_{13} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \right) \\ \varepsilon_{33} &= \frac{\partial U_3}{\partial x_3}, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Тогда тензор деформации D_c можно записать так:

$$D_c = \varepsilon_{11} i_1 i_1 + \varepsilon_{22} i_2 i_2 + \varepsilon_{33} i_3 i_3 + \varepsilon_{23} (i_2 i_3 + i_3 i_2) + \\ + \varepsilon_{31} (i_3 i_1 + i_1 i_3) + \\ + \varepsilon_{12} (i_1 i_2 + i_2 i_1) \quad (38)$$

или в свернутом виде:

$$D_c = \varepsilon_\lambda i_\lambda i_\lambda, \quad (\lambda = 1, 2, 3) \quad (39)$$

Преобразование координат тензора деформаций при повороте осей координат

Это преобразование производится аналогично преобразованию координат тензора напряжений, изложенному на стр. 253—254.

В повернутой системе координат $O x'_1 x'_2 x'_3$ координаты тензора деформаций (39) будут выражаться формулой, аналогичной формуле (6')

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_{\mu\nu} &= \varepsilon_{11} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 1} + \varepsilon_{12} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 2} + \varepsilon_{13} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 3} + \\ &+ \varepsilon_{21} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 1} + \varepsilon_{22} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 2} + \varepsilon_{23} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 3} \\ &+ \varepsilon_{31} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 1} + \varepsilon_{32} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 2} + \varepsilon_{33} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 3} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Или в силу симметрии тензора деформаций в (40) $\varepsilon_{23} = \varepsilon_{32}$, $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31}$, $\varepsilon_{21} = \varepsilon_{12}$, поэтому (40) можно написать так:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_{\mu\nu} &= \varepsilon_{11} \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 1} + \varepsilon_{22} \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 2} + \varepsilon_{33} \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 3} + \\ &+ \varepsilon_{23} (\alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 3} + \alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 2}) + \\ &+ \varepsilon_{31} (\alpha_{\mu 3} \alpha_{\nu 1} + \alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 3}) + \\ &+ \varepsilon_{12} (\alpha_{\mu 1} \alpha_{\nu 2} + \alpha_{\mu 2} \alpha_{\nu 1}) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Давая в (41) индексам μ и ν значения, равные 1, 2, 3, получим все шесть координат ε'_{11} , ε'_{22} , ε'_{33} , ε'_{23} , ε'_{31} , ε'_{12} тензора деформации относительно нового триэдра i'_1, i'_2, i'_3 :

$$\varepsilon'_{11} = \varepsilon_{11} \alpha_{11}^2 + \varepsilon_{22} \alpha_{12}^2 + \varepsilon_{33} \alpha_{13}^2 + 2\varepsilon_{12} \alpha_{11} \alpha_{12} + 2\varepsilon_{23} \alpha_{12} \alpha_{13} + 2\varepsilon_{31} \alpha_{13} \alpha_{11}, \\ \varepsilon'_{22} = \varepsilon_{11} \alpha_{21}^2 + \varepsilon_{22} \alpha_{22}^2 + \varepsilon_{33} \alpha_{23}^2 + 2\varepsilon_{12} \alpha_{21} \alpha_{22} + 2\varepsilon_{23} \alpha_{22} \alpha_{23} + 2\varepsilon_{31} \alpha_{23} \alpha_{21},$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{33} &= \varepsilon_{11} \alpha_{31}^2 + \varepsilon_{22} \alpha_{32}^2 + \varepsilon_{33} \alpha_{33}^2 + 2\varepsilon_{12} \alpha_{31} \alpha_{32} + 2\varepsilon_{23} \alpha_{32} \alpha_{33} + 2\varepsilon_{31} \alpha_{33} \alpha_{31}, \\ \varepsilon'_{23} &= \varepsilon_{11} \alpha_{21} \alpha_{31} + \varepsilon_{22} \alpha_{22} \alpha_{32} + \varepsilon_{33} \alpha_{23} \alpha_{33} + \varepsilon_{12} (\alpha_{21} \alpha_{32} + \alpha_{22} \alpha_{31}) + \\ &\quad + \varepsilon_{23} (\alpha_{22} \alpha_{33} + \alpha_{23} \alpha_{32}) + \alpha_{31} (\alpha_{23} \alpha_{31} + \alpha_{21} \alpha_{33}), \\ \varepsilon'_{31} &= \varepsilon_{11} \alpha_{31} \alpha_{11} + \varepsilon_{22} \alpha_{32} \alpha_{12} + \varepsilon_{33} \alpha_{33} \alpha_{13} + \varepsilon_{12} (\alpha_{31} \alpha_{12} + \alpha_{32} \alpha_{11}) + \\ &\quad + \varepsilon_{23} (\alpha_{32} \alpha_{13} + \alpha_{33} \alpha_{12}) + \varepsilon_{31} (\alpha_{33} \alpha_{11} + \alpha_{31} \alpha_{13}), \\ \varepsilon'_{12} &= \varepsilon_{11} \alpha_{11} \alpha_{21} + \varepsilon_{22} \alpha_{12} \alpha_{22} + \varepsilon_{33} \alpha_{13} \alpha_{23} + \varepsilon_{12} (\alpha_{11} \alpha_{22} + \alpha_{12} \alpha_{21}) + \\ &\quad + \varepsilon_{23} (\alpha_{12} \alpha_{23} + \alpha_{13} \alpha_{22}) + \varepsilon_{31} (\alpha_{13} \alpha_{21} + \alpha_{11} \alpha_{23})\end{aligned}$$

Выводы

1. Прямым методом тензорного исчисления в работе даны:
 - а) преобразование координат векторного тензора двумя способами,
 - б) вывод тензора упругих напряжений и преобразование координат этого тензора при повороте осей координат,
 - в) вывод тензора бесконечно малых деформаций и преобразование его координат.
2. Для второго способа преобразования координат тензора была доказана специальная теорема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости, 1949.
2. Кочия Н. Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления, 1951.
3. Лагальи М. Векторное исчисление, 1936.
4. Кутилли Д. И. Теория конечных деформаций, 1947.

(Получена редакцией 24 марта 1952 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Головин П. В. Формулы для вычисления дополнительного сахара за счет снижения доброкачественности патоки.	3
Головин П. В. К 150-летию создания свеклосахарного производства в нашей стране	5
Жура К. Д., Ямпольский Н. Я. Рафинадный комбайн системы Головина П. В.	15
Головин П. В., Романкевич М. Я., Гирко И. П. Опыт очистки кормовой патоки ионитами.	19
Мальцев П. М., Ройтер И. М., Метюшев Б. Д., Зафирная М. В., Зинко Б. М., Великая Е. И. Осветление мутного пивного сула сепарированием	23
Стабников В. Н. Русские брагоперегонные аппараты с колоннами начала XIX века.	37
Стабников В. Н., Кручинин В. Ф. Некоторые вопросы технологии производства рома	43
Ройтер И. М. Графики для определения физических констант водно-спиртовых смесей.	57
Литвак И. М. О применении кислотного способа осахаривания крахмала в производстве спирта.	71
Знаменский Г. М. О методах расчета оборудования сахарных заводов.	83
Демчук Г. С., Попов В. Д. Депрессия при варке рафинадного утфеля.	87
Попов В. Д. Примерный тепловой расчет вакуум-аппарата периодического действия.	101
Попов В. Д. Коэффициенты теплопередачи в рафинадных вакуум-аппаратах.	113
Попов В. Д. Диаграмма теплосодержания сахарных растворов и утфеля.	125
Шлипенко З. С. О свеклоподъемном насосе системы Знаменского Г. М.	131
Скобло Д. И. Методика проектирования систем автоматического контроля регулирования технологических процессов.	147
Скобло Д. И. Принципиальная схема автоматизации утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия.	159
Глыбин И. П., Скобло Д. И. Разработка пьезометрических автоматических плотномеров для продуктов спиртового и сахарного производств.	171
Сабурдо Г. А. Гидравлический тахометр с ограниченным подъемом жидкости.	185
Павлов И. С. О тепловых константах сахара.	189
Наумов А. Л. Связь между аналитическим методом исследования работы трехфазных асинхронных машин и методом круговых диаграмм.	193
Бородянский М. Я. Расчет на устойчивость многоярусных рамных циклически-симметричных систем.	199
Бородянский М. Я. Приближенный способ расчета пространственных рам на устойчивость.	233
Бородянский М. Я. Устойчивость жестко-заземленных двух- и трехпролетных стержневых наборов с учетом закручивания стержней.	241
Осипов П. Н. О применении прямого метода тензорного исчисления в теории упругости.	249

БИ 21440. Заказ № 776. Подписано к печати 13/ХІ 1952 г. Печати. листов 22,25.
Формат бумаги $70 \times 108^{1/16}$. Бум. листов 8,25. Учетно-издат. 18,5. Тираж 1000 экз.

Типография издательства Киевского государственного университета
им. Т. Г. Шевченко, Киев, Владимирская, 60.