

607.007.5
А 93

~~664.88~~
~~А. 93~~

Проф. Л. Я. АУЭРМАН

ПРОИЗВОДСТВО СУХАРЕЙ



ПИЩЕПРОМИЗДАТ

19 — МОСКВА — 43

А 93

ДЕП.

554

51

Проверено 1959 г.

Проф. Л. Я. АУЭРМАН

МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ПРОИЗВОДСТВО СУХАРЕЙ

64747

МОСКОВСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР
ИМ. ЛЕНИНА

1959 г. 86, 08

МОСКОВСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР



ПИЩЕПРОМИЗДАТ

19 — МОСКВА — 43

МОСКОВСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы производство сухарей приняло достаточно широкие размеры и получило соответствующее материальное оснащение. Ни правильная эксплуатация современного сушильного оборудования сухарных цехов и предприятий, ни тем более проектирование их невозможны без наличия кадров, вооружённых необходимым знанием основ сушильного дела и элементов оборудования сушильных цехов.

Книга эта рассчитана на подготовку квалифицированных рабочих и работников сухарных цехов.

Значительная часть материала книги будет, возможно, бесполезной и для инженерно-технических работников, руководящих производством сухарей.

В ряде глав автором использованы материалы Технического отдела Главхлеба НКПП СССР.

Мы заранее благодарны всем товарищам, которые окажут автору помощь указаниями на замеченные в настоящей работе недочёты.

I. СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА СУХАРЕЙ

В технологическом процессе производства сухарей можно различать следующие основные этапы: 1) выдержка хлеба, 2) резка хлеба на ломти, 3) укладка ломтей на вагонетки, 4) сушка, 5) охлаждение готовых сухарей, 6) отбраковка и упаковка и 7) хранение. На рис. 1 изображена аппаратурно-технологическая схема производства сухарей в современном сухарном цехе, оборудованном тоннельной сушилкой.

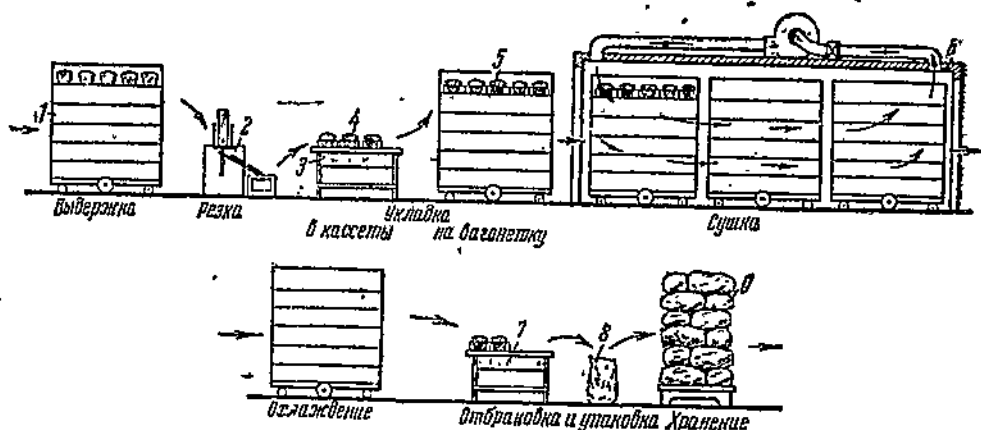


Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема сухарного производства

Сухари из хлеба, нарезанного на ломти и высушенного до влажности 10—12%, являются продуктом, выдерживающим длительное хранение.

Особенное значение сухари приобретают в питании бойцов нашей Красной Армии или участников экспедиций, походов и т. п., когда снабжение печёным хлебом по тем или иным причинам невозможно или затруднительно.

Большое преимущество сухарей заключается в том, что они вследствие низкого содержания влаги пригодны к непосредственному употреблению в пищу в любых температурных условиях. Этого нельзя сказать про хлеб, который замерзает на морозе.

Хлеб, предназначенный для производства сухарей, до его резки на ломти выдерживают в течение определённого времени на полках вагонеток или на специальных стеллажах-полках. Зачерствевший в процессе выдержки 1 и пришедший в состояние наилучшее для резки на ломти хлеб поступает на хлебрезку 2, которая механически режет хлеб на ломти требуемой толщины. На столе 3 ломти укладываются в кассеты 4, которые подаются на сушильную вагонетку 5. Вагонетка, загруженная кассетами, заполненными ломтями хлеба, поступает в сушильную камеру (тоннель) сушилки 6. За время нахождения в сушильной камере ломти хлеба омываются нагретым воздухом, испаряющим и уносящим из них влагу. Вагонетки с сохнувшими ломтями перемещаются по сушильному

тоннелю и, когда сухари готовы и влажность их не превышает допустимой величины, выкатываются из него с противоположного конца.

Вагонетку с готовыми сухарями после выхода из сушилки некоторое время оставляют в покое для охлаждения, затем подкатывают к столу 7. На этом столе сухари освобождают из кассет, отбраковывают и правильными рядами упаковывают в многослойные бумажные пакеты 8 (крафтмешки) или другую тару. Пакеты с сухарями для хранения укладывают на решётчатые подтоварники в штабели 9, в которых и хранят их до отправки.

III. ХЛЕБ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХАРЕЙ

Для производства сухарей должен применяться хлеб из хорошо выброженного теста, хорошо пропеченный, но негорелый, с нормальной кислотностью и пористостью. Хлеб из недостаточно выброженного теста плохо сохнет и даёт медленно намокающий сухарь.

Хлеб плохо разрыхлённый, плотный, с пониженной пористостью, нарезанный на ломти, в сушилке сохнет гораздо медленнее, чем хлеб с нормальной пористостью. Также существенно, чтобы пористость хлеба была по возможности равномерной по всему разрезу хлеба. Пористость мякиша нижней части ломтя хлеба всегда несколько меньше, чем пористость в центральной и верхней его частях. Поэтому нижняя часть ломтя хлеба обычно сохнет несколько медленнее верхней.

Нежелателен мякиш с очень крупной пористостью. Мякиш такого хлеба очень непрочен и ещё в процессе резки хлеба на ломти может быть повреждён. Сухари из такого хлеба очень ломки и хрупки и не выдерживают перевозки и перевалки.

Не менее существенным является показатель влажности хлеба. При приготовлении хлеба для производства сухарей не рекомендуется стремиться к тому, чтобы влажность хлеба была наибольшей из допустимых стандартом: чем выше влажность хлеба, тем больше воды надо из него испарить в процессе сушки сухарей, тем больше надо затратить на это тепла и топлива.

Казалось бы, что на основании этого соображения хлеб для сухарей надо готовить с возможно наименьшим содержанием воды. Однако хлеб с очень низким содержанием влаги, как правило, имеет плотный, с пониженной пористостью, мякиш и будет сохнуть медленнее, несмотря на его пониженную влажность.

По опытным данным сушильной лаборатории Всесоюзного теплотехнического института им. Дзержинского [2], влажность целого хлеба (с учётом корки и мякиша), предназначенного для сушки сухарей, должна составлять 42—44%. Всесоюзный научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности (ВНИИХП) рекомендует [3] готовить для сушки сухарей хлеб с влажностью мякиша 47,5—49%, при выходе хлеба 150—154.

Вес отдельного хлеба не должен превышать вес, допускаемый стандартом. Хлеб для производства сухарей может быть как формовым, так и подовым. Однако формовой хлеб, особенно при развесе хлеба в 1,5—2 кг в штуке, более удобен для производства сухарей, так как сухари в таком случае однородны по форме и размерам, поэтому сохнут более равномерно и более удобны при упаковке.

Способ приготовления теста и вообще весь режим приготовления ржаного хлеба может быть любым из принятых на данном предприятии, лишь бы он обеспечивал выпечку хорошего хлеба, отвечающего перечисленным выше требованиям. Нецелесообразно лишь применение заварки.

Хлеб, приготовленный с применением заварки, прочно связывает воду и поэтому медленно отдаёт влагу в процессе сушки сухарей.

В тех случаях, когда производство ржаного хлеба для сухарей приходится организовывать заново, приготовление ржаного теста можно вести по ниже приводимому способу, рекомендованному Главхлебом НКПП СССР в Сборнике технологических инструкций [4].

РЕЦЕПТУРА

Приказом НКПП СССР от 15 января 1938 г. установлено следующее соотношение весовых частей сырья:

мука ржаная обойная	100,0
соль	1,5
дрожжи	0,03
масло растительное (для смазки формы) . .	0,15

СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ

Приготовление ржаного теста ведётся головочным способом и состоит из двух циклов: полного разводочного и сокращённого производственного.

А. Разводочный цикл

Полный разводочный цикл состоит из следующих четырёх стадий: 1) дрожжевой головки, 2) промежуточной головки, 3) исходной головки и 4) теста.

Дрожжевая головка

Для приготовления дрожжевой головки употребляют:

муки	90,0 кг
воды	85,0 л
спелой головки	25,0 кг
дрожжей прессованных	2,0

Начальная температура дрожжевой головки 25°, время брожения — 4,5 часа, конечная кислотность — 9—10°.

Промежуточная головка

Готовая дрожжевая головка делится на две части и на каждой из них готовится промежуточная головка по следующей рецептуре:

дрожжевой головки (1/2)	100 кг
муки	125,0
воды	110,0 л

Начальная температура промежуточной головки — 26°, время брожения — 4,5—5 часов и конечная кислотность — 11—12°.

Исходная головка

Каждая готовая промежуточная головка делится на три части, на каждой из них готовится исходная головка по следующей рецептуре:

промежуточной головки (1/3)	110,0 кг
муки	155,0
воды	180,0 л

Начальная температура исходной головки — 26—27°, время брожения — 4,5—5 часов и конечная кислотность — 13—14°.

Тесто

Готовая исходная головка делится на четыре части, из которых одна (125 кг) идёт для возобновления исходной головки (в сокращённом производственном цикле), а три части по 90 кг на приготовление трёх дежей теста по следующей рецептуре:

исходной головки	90 кг
муки	150 "
воды	100 л
соли	3,2 кг

Начальная температура теста — 28—29°, время брожения — около 2 часов и конечная кислотность 9—10°.

Б. Производственный цикл

Сокращённый производственный цикл состоит из приготовления 1) постоянно возобновляемой исходной головки и 2) теста по следующей рецептуре:

Исходная головка

исходной головки	125,0 кг
муки	150,0 "
воды	125,0 л

Начальная температура — 26—27°, время брожения — 4,5—5 часов и конечная кислотность — 13—14°.

Тесто

Исходная головка делится на четыре части, из которых одна (125 кг) идёт на возобновление исходной головки, а три (по 90 кг) — на приготовление трёх дежей теста по следующей рецептуре:

исходной головки	90 кг
муки	150 "
воды	100,0 л
соли	3,2 кг

Начальная температура теста — 28—29°, время брожения — около 2 часов, конечная кислотность — 9—10°.

По такому сокращённому циклу работают летом пять, а зимой десять дней, после чего освежают головки приготовлением их заново по полному разводочному циклу.

III. ПОДГОТОВКА ХЛЕБА К СУШКЕ

Подготовка хлеба к сушке сводится: 1) к выдержке хлеба перед резкой его на ломти, 2) к резке на ломти, к отбраковке и сортировке нарезанных ломтей и 3) к укладке ломтей в кассеты (или на листы).

Выдержка хлеба перед резкой его на ломти

Хлеб, предназначенный для производства сухарей, выдерживается определённое время и лишь после этого его режут на ломти и сушат.

Целью выдержки хлеба является приведение его в такое состояние, при котором он давал бы при резке на ломти наименьшее количество повреждённых ломтей и крошки. Особенное значение выдержка хлеба

приобретает при использовании для резки специальных хлеборезальных машин.

Срок выдержки хлеба до его резки на ломти колеблется обычно в пределах 12—36 часов, доходя в отдельных случаях до 48 часов. Чем скорее черствеет хлеб, тем скорее он приходит в состояние пригодности к резке. Поэтому, чем ниже температура воздуха в хлебохранилище, тем меньшим может быть срок выдержки хлеба до резки.

Срок необходимой выдержки хлеба в значительной мере определяется и типом (конструкцией) хлеборезок и состоянием их ножей. Чем совершеннее хлеборезка по своей конструкции, чем острее и чище её нож, тем меньшей может быть длительность выдержки хлеба.

Недостаточная выдержка хлеба приводит к тому, что у значительной части ломтей верхняя корка отслаивается от мякиша и из них получаются сухари с трещиной в этом месте.

Резко увеличивается также количество хлеба, прилипающего к ножам хлеборезки и идущего в отходы в виде крошек.

Длительность выдержки хлеба практически не влияет на скорость сушки сухарей. Сушильная лаборатория Всесоюзного теплотехнического института им. Дзержинского рекомендует выдерживать хлеб до резки его на ломти в течение 8—12 часов, считая такой срок выдержки наиболее благоприятным для качества сухарей. ВНИИХП также рекомендует выдерживать хлеб до резки его на ломти в течение 8—12 часов при температуре в помещении экспедиции $+10 - 12^{\circ}$.

Практика производства сухарей показывает, однако, что в зависимости от состояния и типа хлеборезок, температуры в хлебохранилище и свойств хлеба выдержка хлеба часто должна быть более длительной, доходя до 24 часов, а иногда и более.

Резка хлеба на ломти

Толщина ломтей. При определении толщины ломтя приходится учитывать ряд моментов: влияние толщины ломтей на скорость сушки сухарей, на их качество, форму, прочность. Нельзя при этом не учитывать и температурного режима сушки. Длительность сушки тем меньше, чем тоньше ломти хлеба.

Опыты, проведённые в 1940 г. в сушильной лаборатории кафедры технологии хлебопечения Московского технологического института пищевой промышленности, показали, что если сухари из ломтей толщиной 10 мм требовали для сушки (при 120° и скорости воздуха 0,6 м/сек) около 100 минут, то ломти из этого же хлеба толщиной 20 мм сохли уже 200 минут, а при толщине в 30 мм — 350 минут.

Увеличение толщины ломтей с 10 до 30 мм увеличило длительность сушки в 3,5 раза. На основании этого казалось бы, что хлеб для сушки следует резать на ломти наименьшей толщины (10 мм, а может быть и меньше). Однако здесь нельзя не учитывать влияния толщины ломтя на прочность сухарей, на их форму и качество.

Опыты показали, что если для того, чтобы сломать сухарь из ломтя толщиной 30 мм, требуется усилие, соответствующее давлению в 50 кг, то при толщине ломтя в 20 мм сухарь ломается уже от усилия в 30 кг, а при толщине ломтя в 10 мм достаточно усилия в 15 кг, т. е. чем тоньше сухарь, тем он менее прочен.

Сухари из ломтей тоньше 20 мм в процессе сушки были в значительной части покороблены и потеряли правильную форму. Чем тоньше ломти хлеба, тем больше процент таких сухарей.

Покоробленные сухари, будучи уложенными в мешки или пакеты, занимают больше места, чем сухари правильной формы, и к тому же значительно скорее и легче ломаются при укладывании пакетов с сухарями в штабели и при их перемещении.

Сухари из ломтей толщиной более 25 мм требуют чрезмерных усилий для того, чтобы их сломать; размокают такие сухари очень медленно. В значительной части таких сухарей наблюдались пустоты, расслаивающие сухарь на две половинки.

На основании вышесказанного можно рекомендовать резать хлеб на ломти толщиной 20—22 мм.

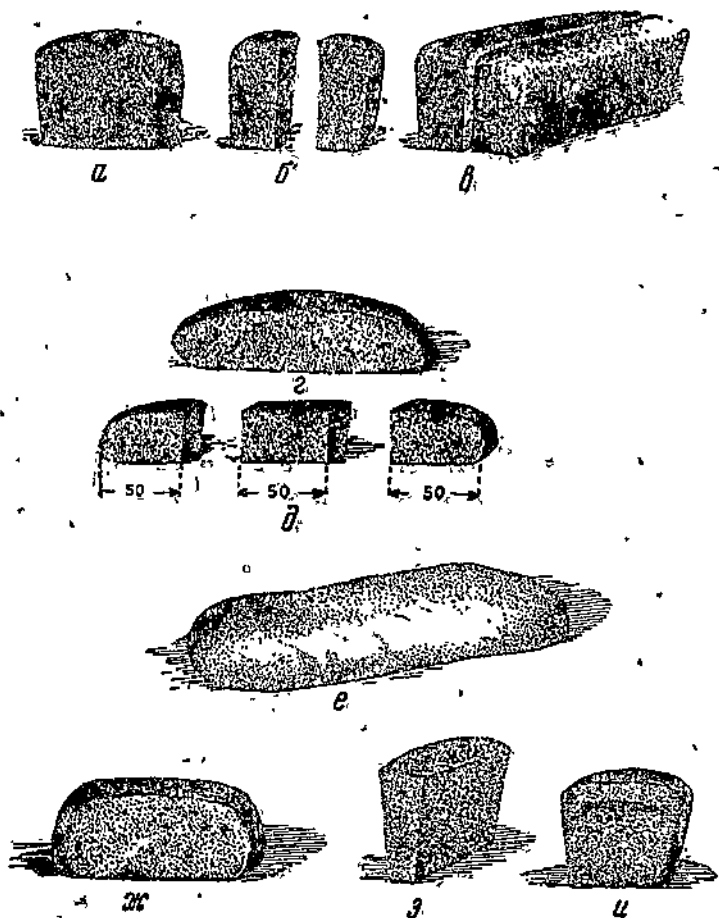


Рис. 2. Резка хлеба на ломти:

а—целый ломоть из формового хлеба; б—полудомоть из формового хлеба; в—формовый хлеб, разрезанный вдоль; г—ломоть из круглого подового хлеба; д—ломоть из круглого подового хлеба, разрезанный на части; е—подовый хлеб в виде батона; ж—ломоть из батона; з—клинообразно отрезанный ломоть; и—ломоть с отслоившейся верхней коркой

Государственный общесоюзный стандарт на сухари (ГОСТ, 686-41) предусматривает толщину сухарей из формового и подового хлеба 20—25 мм.

Сухари из формового хлеба могут быть как в виде целых ломтей 25 мм, а из горбушек подового — до 35 мм. Ширина ломтей из подового хлеба должна быть не менее 50 мм.

Для сухарей, получаемых с макаронных сушилок типа «Игетро», или «Кайзер», при низкой температуре сушильного воздуха (40—60°) ГОСТ допускает толщину ломтей от 15 до 25 мм.

Сухари из формового хлеба могут быть как в виде целых ломтей (рис. 2, а), так и в виде полудинок (рис. 2, б).

При резке формового хлеба на полдинок буханка хлеба сперва режется вдоль на две половины (рис. 2, в), а потом уже поперёк на

отдельные пол-ломтики. Подовый хлеб режется сперва на ломти необходимой толщины (рис. 2, а). В случае, если получающиеся при этом ломти слишком длинные, их режут на отдельные ломтики (рис. 2, б) шириной не менее 50 мм.

Значительно удобнее (особенно при резке хлеба не вручную, а на специальных хлеборезках), если подовый хлеб выпекается в виде батонов, по сечению отвечающих нормальному размеру сухаря (рис. 2, в). Такие батоны достаточно резать поперёк на ломти требуемой толщины (рис. 2, ж).

При резке хлеба особенное внимание должно быть обращено на то, чтобы ломоть имел одинаковую толщину во всех частях. Клинообразные ломти (рис. 2, а) в более толстой части будут недосушенными, а в менее толстой пересушенными.

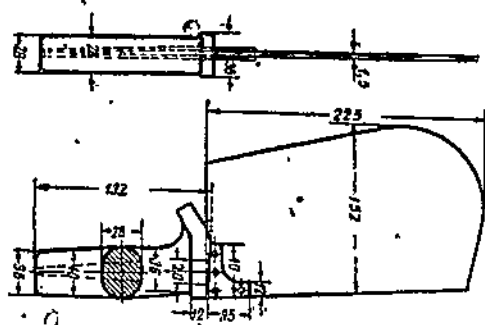


Рис. 3. Хлеборезный нож

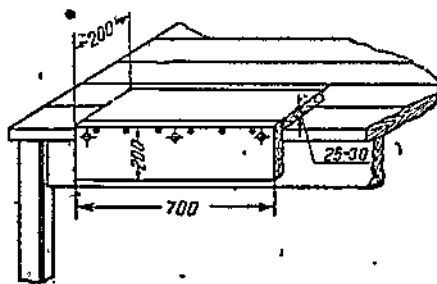


Рис. 4. Крепление на кромке стола доски для резки хлеба

Некоторая неравномерность по толщине неизбежна только у горбушек. Надо следить за тем, чтобы наиболее толстая часть горбушек не превышала толщины ломтей из срединной части хлеба. Ломти с отслоившейся верхней коркой (рис. 2, и) или другими повреждениями верняка дадут сухари с трещинами.

Резка хлеба вручную ножом

На ряде мелких предприятий и сухарных цехов хлеб режут на ломти вручную обычным хлеборезным ножом (рис. 3). Резка хлеба может проводиться на любом столе, имеющемся на производстве. Для сохранения крышки стола к ней для резки хлеба прикрепляют специальную доску так, чтобы нож не мог касаться головки гвоздя или шурупа (рис. 4).

Один рабочий при резке формового хлеба на ломти толщиной 20—25 мм может за час нарезать до 180 кг хлеба.

Резка хлеба ручными хлеборезками

Легче и ровнее режется хлеб на ломти простейшими ручными хлеборезками, из которых наибольшее распространение получили настольные ручные хлеборезки конструкции Гончарова и Киселёва.

Хлеборезка Гончарова очень проста и легко может быть изготовлена в механической мастерской хлебозавода (рис. 5). Она состоит из двух угольников 1 (35 × 35 мм), скреплённых с зазором между ними 3—3,5 мм. К этим угольникам с таким же зазором приварены две направляющих движение ножа дуги 2 шириной 25 мм и толщиной 6 мм. Нож 3 выгнут в виде серпа, имеет на одном конце рукоятку, а другим концом шарнирно крепится между дугами 2 в точке Q.

Для регулирования толщины отрезаемого ломтя на правом угольнике 1 на болтах крепится маленький ограничительный угольник 4. Отверстия для болтов в этом ограничительном угольнике делаются продолговатыми, чтобы можно было регулировать его положение, а следовательно и расстояние между ограничивающей плоскостью и плоскостью движения ножа 3, а этим самым и толщину отрезаемого ломтя хлеба.

Порядок работы на этой хлеборезке следующий: буханку хлеба, при откинутах вверх ноже, вставляют под направляющие дуги, упирая концом в ограничительную планку 4. Затем быстрым опусканием ножа отрезают первый ломоть. После того как ломоть откинут и нож возвращён в верхнее положение,



Рис. 5. Ручная хлеборезка Гончарова

буханка хлеба левой рукой опять придвигается вплотную к ограничителю 4, опять отрезается очередной ломоть, и т. д.

Хлеборезка Киселёва. Эта хлеборезка (рис. 6) несколько сложнее в изготовлении, но зато надёжнее и удобнее в работе. Она также является настольной и также имеет нож, качающийся шар-

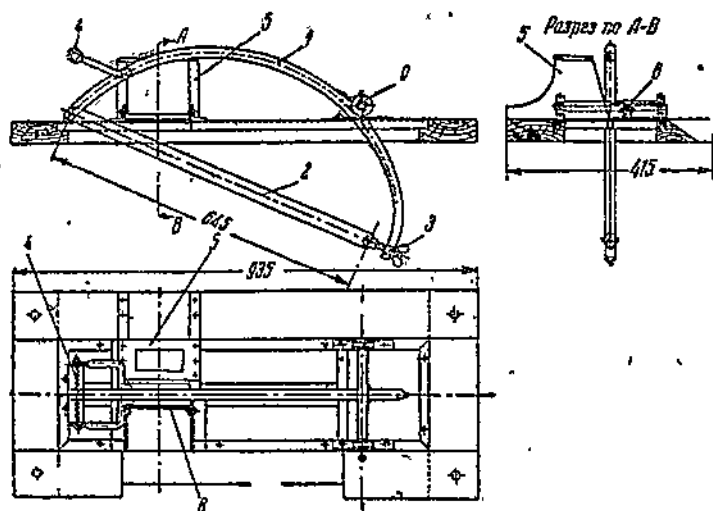


Рис. 6. Ручная хлеборезка Киселёва

нирно в точке Q. Нож состоит из дуги 1 и ножевого полотна 2, натягиваемого «барашком» 3. На дуге 1 укреплена рукоятка 4. Формовый хлеб подаётся под нож через жолоб 5 и упирается концом в ограничительную планку 6. Порядок работы на этой хлеборезке тот же, что и на хлеборезке Гончарова. Хлеборезка Киселёва надёжнее в работе, ножевое полотно её легко сменить для точки, а наличие жолоба 5 исключает возможность перекоса хлеба при резке и, следовательно, получение клинообразных ломтей.

Механические хлеборезки

Существует целый ряд конструкций хлеборезок, приводимых в движение электромотором, например, хлеборезки марки ХРЛ-3, конструкции Розенвальда и ряд других. Мы даём краткое описание лишь двух наиболее надёжных и распространённых конструкций.

Хлеборезка ХРЛ-3 (рис. 7) состоит из каркаса 1, дискового ножа 2, эксцентрично укрепленного на вертикальном валу 6, загрузочной трубы 4, упорного угольника 3, положение которого может быть произвольно изменяемо, и разгрузочного лотка 5. Хлеборезка приводится в движение электромотором 7. Каркас хлеборезки в целях безопасности со всех сторон закрыт сплошными стенками.

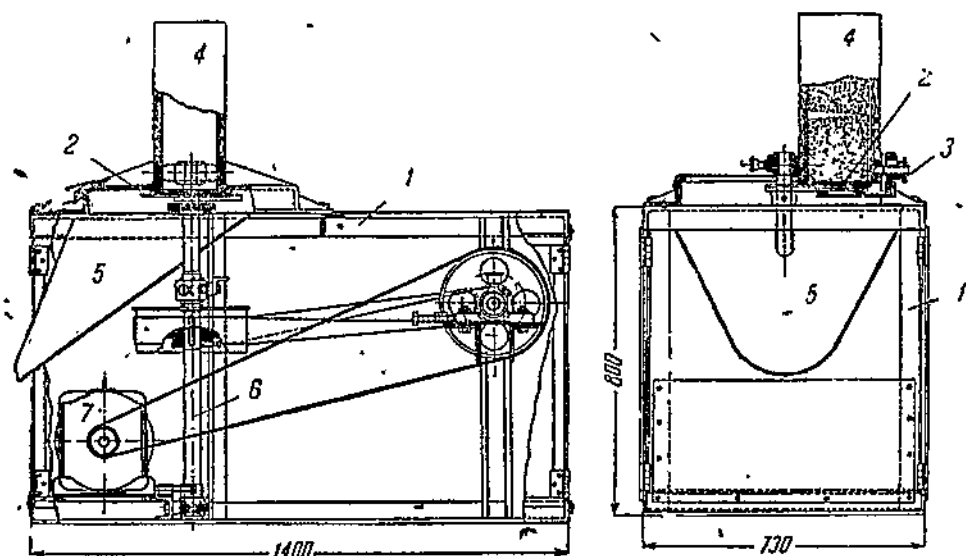


Рис. 7. Хлеборезка ХРЛ-3

Работа на машине производится следующим образом: буханки хлеба закладываются в вертикальном положении в загрузочную трубу 4. Под действием собственного веса и веса вышележащих буханок нижняя буханка упирается в упорный угольник 3. Высота положения этого угольника регулирует толщину отрезаемого ломтя. Дисковый нож отрезает нижний край нижней буханки и отодвигает отрезанный ломоть в разгрузочный лоток 5. Толщина отрезаемого ломтя, перемещением детали 3, может регулироваться в пределах 10—30 мм.

Хлеборезка может давать в час до 8760 ломтей. Достоинства машины в простоте и надёжности её конструкции и обслуживания.

Недостатком является то, что машина может давать клинообразные ломти, и при недостаточно выдержанном хлебе или недостаточно остром ноже сильно увеличивается количество повреждаемых при резке хлеба ломтей.

Хлеборезка Розенвальда несколько сложнее в конструктивном отношении, но зато выгодно отличается большей равномерностью размеров ломтей хлеба и возможностью резки хлеба со значительно сокращённым временем выдержки.

Устройство хлеборезки (рис. 8) таково: на станине 1, смонтированной на раме 2, укреплены рамки 3, в которые вставлены ножи 4. Ножи в рамке несколько сдвинуты один к другому так, что концы ножей в плане образуют угол. Рамки 3 соединены со штоком поршня 5, имеющим прямолинейное возвратно-поступательное движение по направляю-

щим 6. Для подачи хлеба к ножам установлен цепной транспортёр 7 с планками 8. Для продвижения разрезанного хлеба от ножей к месту укладки на кассеты предусмотрен наклонный лоток 9. Для сбора крошек и обрезков ниже крайнего положения ножей установлен жолоб 10.

Привод хлеборезки в действие осуществляется электромотором 11 через редуктор. Производительность хлеборезки 24—27 т хлеба в сутки.

Хлеборезальная машина обычно обслуживается двумя работницами; одна из них загружает хлеб в хлеборезку, а другая принимает и убирает нарезанные ломти хлеба. Если хлеборезка удалена от места укладки хлеба в кассеты (или на листы), то ломти нарезанного хлеба

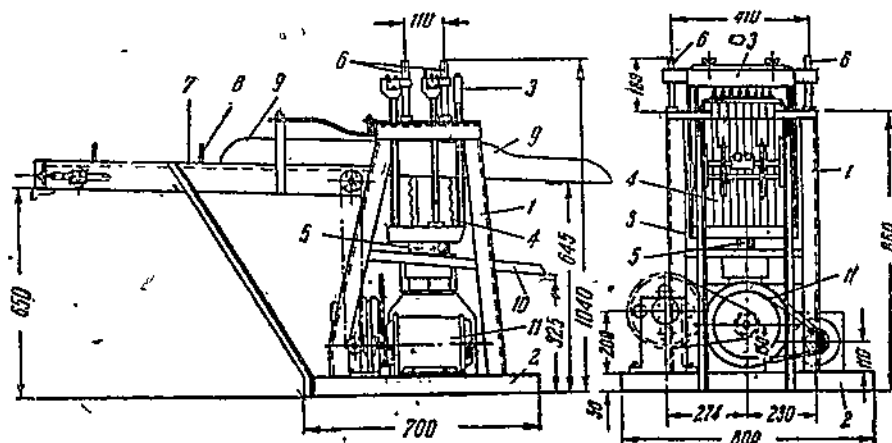


Рис. 8. Хлеборезка Розенвальда:

1—станина; 2—рама; 3—рамка для ножей; 4—ножи; 5—шток поршня; 6—направляющие; 7—цепной транспортёр; 8—планки транспортёра; 9—наклонный лоток; 10—жолоб; 11—электромотор

укладывают в ящики или корзины (иногда на хлебные лотки), в которых их и транспортируют к месту укладки в кассеты. Укладка в ящики или корзины должна вестись правильными рядами, вплотную ломоть к ломтю.

Укладка навалом обычно влечёт за собой повреждение известного количества ломтей.

Отбраковка и сортировка нарезанных ломтей

Нарезанные ломти отбраковывают и сортируют при приёме их с хлеборезки и укладке в кассеты (или на листы). Отбраковке подлежат ломти нестандартные по размерам (толще или тоньше допускаемых стандартом), неравномерные по толщине (клинообразные) и повреждённые (сломанные, с отслоившейся верхней коркой).

Отбракованные ломти хлеба, как и отходы, получающиеся при резке (крошка), идут на переработку в виде мочки, если сухари сушат в сухарном цехе хлебопекарного предприятия, выпекающего хлеб исключительно для сухарей. В случае, если сухари сушат на сухарном предприятии, получающем хлеб извне, отбракованные ломти и отходы резки подвергают сушке отдельно и отдельно упаковывают, а высушенные отходы и брак резки отправляют на переработку (в мочку) на предприятие, с которого получают хлеб.

Укладка ломтей хлеба в кассеты (или на листы)

Отсортированные, стандартные по размерам и неповреждённые ломти для сушки их в сушилах обычно укладывают в кассеты.

Описание конструкций кассет см. в главе VI.

При укладке ломтей в кассеты требуется, чтобы зазоры между рядами ломтей были равномерными. Горбушки и более толстые ломти, сохнувшие медленнее, укладывают к одному краю кассеты. Кассету помещают на вагонетку таким образом, чтобы этот край кассеты был обращён наружу, так как практика показывает, что здесь сухари сохнут скорее, чем в центральной части кассеты и вагонетки. Иногда для обжарки, или сушки в печи, ломти хлеба укладывают на металлические листы.

IV. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА СУШКИ СУХАРЕЙ

В процессе сушки мы имеем дело с продуктом, влажность которого надо снизить, с водой, которую надо удалить из сушимого продукта, и воздухом, с помощью которого осуществляется процесс сушки.

Для того чтобы разбираться в существе процесса сушки и уметь этот процесс регулировать, необходимо обратиться к некоторым основным понятиям и законам физики.

Теплота

Тепловая энергия — теплота — играет в процессе сушки решающую роль. Постараемся поэтому определить понятия: температура, единица количества тепла, теплоёмкость, скрытая теплота испарения, теплосодержание, теплообмен путём теплопроводности, конвекции и излучения, теплоотдача и теплопередача.

Температура. Температура является показателем степени нагретости тела¹. Чем больше нагрето тело (чем оно теплее, чем горячее), тем выше его температура, и, наоборот, чем меньше нагрето тело (чем оно холоднее), тем ниже его температура.

Измерение температуры. Степень нагретости тела — его температуру — надо уметь характеризовать количественно.

При сушке сухарей нам надо знать, какова же температура сушильного воздуха в моменты 1) входа в калорифер, 2) выхода из калорифера, 3) поступления в сушильную камеру и 3) выхода из сушильной камеры. Нам надо также знать температуру сушимого продукта в момент его поступления в сушилку и в момент выхода из неё.

Как же можно измерять температуру?

Для измерения температуры обычно пользуются термометром. Для измерения сравнительно невысоких температур (до 300°) наиболее распространено применение так называемых жидкостных (обычно ртутных) термометров.

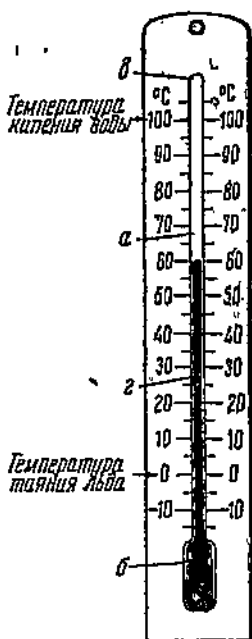
Схема ртутного термометра дана на рис. 9. Основной частью ртутного термометра является тоненькая стеклянная трубка *a* с очень узким (капиллярным) внутренним каналом. На нижнем конце трубка заканчивается расширенной частью *б*. Эта расширенная часть и нижняя часть тонкой трубки *a* заполняются ртутью. После этого воздух из незаполненной ртутью части трубки *a* выкачивается и верхний конец *в* этой трубки наглухо запаивается.

¹ В физике все предметы и вещества, встречающиеся в природе, называются телами. Физика различает тела твёрдые (камень, дерево и т. п.), тела жидкие (вода, нефть и т. п.) и тела газообразные (воздух, пар и т. п.).

Действие термометра, как прибора для измерения температуры, основано на свойстве ртути (также как и других жидких, твёрдых и газообразных тел) расширяться и увеличиваться в объёме при нагревании. Расширяющаяся при повышении температуры ртуть, увеличиваясь в объёме, устремляется вверх по тонкой трубке *a*, при понижении температуры ртуть в результате сокращения в объёме опускается. Следовательно, по уровню ртути в трубке можно судить о температуре.

Для обозначения измеряемой температуры в градусах на пластинке *z* термометра наносится температурная шкала.

В СССР и в ряде других стран принята температурная шкала Цельсия¹. Эта температурная шкала принимает за нулевую точку (за ноль



градусов) температуру таяния льда. За сто градусов в этой шкале принимается температура кипения воды (при нормальном атмосферном давлении 760 мм рт. ст.). Поместив трубку с ртутью в тающий лёд, мы по уровню ртути можем нанести на шкале деление (чёрточку), соответствующее нулю градусов (0°). Перенеся термометр в кипящую воду, мы увидим, что ртуть термометра начнёт быстро подниматься и остановится на определённом уровне. На этом уровне можно нанести деление, соответствующее ста градусам (100°). Если расстояние между этими точками разделить на 100 равных частей, получится стоградусная шкала Цельсия, изображенная на рис. 9. Каждое деление этой шкалы соответствует одному градусу Цельсия. Таким образом, градус Цельсия, который принято обозначать знаком °C, является одной сотой частью разности температур кипящей воды и тающего льда. Градус Цельсия является принятой в СССР единицей измерения температуры. Температурная шкала термометра ниже 0 и выше 100° имеет такие же деления, как и в промежутке от 0 до 100°.

Рис. 9. Схема ртутного термометра

Температуры ниже нуля обозначаются соответствующими цифрами с написанием знака — (минус).

Так например, температура в семь градусов ниже нуля обозначается —7° C (минус семь градусов Цельсия). Температуры выше нуля обозначаются цифрой со знаком + (плюс), который, однако, часто опускается. Так например, семь градусов выше нуля обозначают 7° C, подразумевая под этим температуру выше нуля (плюс семь градусов Цельсия).

В Соединённых Штатах Америки, в Англии и некоторых других странах для измерения температуры используют не шкалу Цельсия, а шкалу Фаренгейта. Нулевая точка шкалы Цельсия (0° C) соответствует +32,38° шкалы Фаренгейта (+32,38° F). Сто градусов шкалы Цельсия (+100° C) соответствуют +212° F.

Для перевода температуры, выраженной в градусах Цельсия (°C), в температуру, выражаемую в градусах Фаренгейта (°F) и обратно, можно пользоваться следующими формулами:

$$n^{\circ}\text{C} = (1,8 n + 32)^{\circ}\text{F}, \quad (1)$$

где: *n* — число градусов по шкале Цельсия и

$$n_1^{\circ}\text{F} = [0,557 (n_1 - 32)]^{\circ}\text{C}, \quad (2)$$

где *n*¹ — число градусов по шкале Фаренгейта.

¹ По имени учёного Цельсия, предложившего эту шкалу в 1742 г.

Пример 1. Температура воды равна 80°C . Какова температура этой воды в $^{\circ}\text{F}$? Заменяя в формуле (1) n числом 80, пишем:

$$80^{\circ}\text{C} = (1,8 \cdot 80 + 32)^{\circ}\text{F} = (144 + 32)^{\circ}\text{F} = 176^{\circ}\text{F}.$$

Как видим, 80°C равны 176°F .

Пример 2. Температура воздуха равна 60°F . Какова температура этого воздуха в $^{\circ}\text{C}$?

В соответствии с формулой (2) пишем:

$$60^{\circ}\text{F} = (0,557) (60 - 32)^{\circ}\text{C} = (0,557 \cdot 28)^{\circ}\text{C} = 15,6^{\circ}\text{C}.$$

Для некоторых расчётов, например для расчётов, связанных с определением зависимости между объёмом, давлением и температурой газов, используют шкалу абсолютных температур. Один градус этой шкалы соответствует по своей величине одному градусу шкалы Цельсия, но за нулевую точку этой шкалы принята температура -273°C . Исходя из этого, зависимость между температурой в $^{\circ}\text{C}$ и абсолютной температурой может быть выражена следующей формулой:

$$T = 273 + t, \quad (3)$$

где: T — абсолютная температура,
 t — температура в $^{\circ}\text{C}$.

Пример. Температура газа равна 95°C . Чему равна абсолютная температура этого газа? В соответствии с формулой (3) пишем:

$$T = 273 + 95 = 368^{\circ}.$$

Нулевая точка шкалы абсолютных температур — 273°C называется абсолютным нулём на том основании, что эта температура ниже любой, могущей быть достигнутой температуры. Наименьшая температура, достигнутая в настоящее время, лежит около -272°C .

Ртутные термометры могут применяться для измерения температур в пределах от -38°C (при этой температуре ртуть застывает) до $+300^{\circ}\text{C}$ (выше этой температуры ртуть в безвоздушном пространстве термометра начинает закипать).

Для измерения более высоких температур в технике применяются специальные термоэлектрические термометры (термометры сопротивления, термопары).

Описание этих приборов дано в специальных руководствах [5].

Понятие о количестве теплоты

За единицу количества теплоты в технике принимают количество теплоты, необходимое для нагрева одного килограмма воды на 1°C (от $14,5$ до $15,5^{\circ}\text{C}$ при нормальном барометрическом давлении, равном 760 мм рт. ст.). Такая единица количества теплоты носит название большой калории.

В лабораторной практике для измерения малых количеств тепла иногда пользуются другой единицей количества тепла — так называемой малой калорией. Малая калория равна одной тысячной доле большой калории и является количеством тепла, необходимым для нагрева на 1°C одного грамма воды. В дальнейшем изложении под калориями мы везде будем подразумевать большие калории.

Исходя из вышеприведённого определения калории, нам легко подсчитать, например, что для нагрева 2 кг воды на 15° необходимо затратить 30 калорий тепла ($2 \times 15 = 30$).

Теплоёмкость

Количество тепла (в калориях), необходимое для нагрева одного килограмма какого-либо тела на 1°C , называется удельной теплоёмкостью этого тела.

Удельная теплоёмкость воды, на основании этого определения, равна 1,0.

Все другие тела, с которыми мы практически можем столкнуться при производстве хлеба или сухарей (воздух, мука, хлеб, сухари, железо, дерево и др.), имеют теплоёмкость, меньшую, чем вода. Следовательно, удельная теплоёмкость этих тел будет обозначаться числом, меньшим единицы.

Теплоёмкость тел несколько изменяется в зависимости от температуры и давления. При тех пределах изменения температуры и давления, с которыми мы практически сталкиваемся при производстве сухарей, влиянием этих моментов на величину удельной теплоёмкости можно пренебречь.

Значения удельной теплоёмкости ряда тел приведены в табл. 1.

Таблица 1

Т е л о	Удельная теплоёмкость
Воздух	0,24
Вода (в жидком состоянии)	1,00
Водяной пар	0,45
Сухое вещество муки	0,40
Хлеб ржаной	0,66
Сухари ржаные	0,46
Железо	0,11
Дерево	0,40—0,50
Кирпич	0,20—0,25

Расчёт количества тепла, затрачиваемого при нагревании какого-либо тела или освобождаемого при его остывании

В сушильном деле приходится подсчитывать количество тепла, необходимого для нагрева сушильного воздуха, хлеба, сухарей, сушильных вагонок, кассет и т. п.

Для того чтобы произвести такие расчёты, необходимо знать 1) вес нагреваемого тела, 2) на сколько градусов должно быть нагрето тело и 3) какова удельная теплоёмкость этого тела.

Пример 1. Железная кассета весом 4,2 кг поступает в сушилку, имея температуру $+20^{\circ}\text{C}$, а выходит из сушилки нагретая до температуры $+80^{\circ}\text{C}$. Требуется подсчитать, сколько тепла затрачивается на нагрев кассеты с $+20$ до $+80^{\circ}$, т. е. на 60° ($80 - 20 = 60$). Вес кассеты указан выше.

Если бы теплоёмкость железа была равна единице, то на нагрев кассеты потребовалось бы $4,2 \times 60 = 252 \text{ Кал}$. Однако из табл. 1 мы видим, что удельная теплоёмкость железа равна 0,11, поэтому для нагрева кассеты на 60° требуется

$$4,2 \times 60 \times 0,11 = 27,72 \text{ Кал.}$$

Таким образом, количество тепла в калориях, необходимое на нагрев какого-либо тела на определённое число градусов, равно произведению веса тела в килограммах на число градусов, на которое тело нагревается и на его удельную теплоёмкость.

Число же градусов, на которое нагревается тело, равно разности температур тела до и после нагрева.

Правило подсчёта количества тепла, необходимого для нагрева тела, можно выразить значительно короче, в виде формулы. Если мы условимся обозначать: через Q — количество тепла (в калориях), необходимое для нагрева тела, G — вес тела в кг,

c — удельную теплоёмкость тела,
 t_1 — температуру тела перед нагревом в °С,
 t_2 — температуру тела после нагрева в °С, то формула, выражающая правило подсчёта количества тепла, будет такова:

$$Q = g \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \text{ Кал.} \quad (4)$$

Ниже в примере 2 мы приводим примерный подсчёт с помощью этой формулы расхода тепла на нагрев определённого тепла.

Пример 2. Требуется определить, сколько теплоты будет затрачено на нагрев 14 кг ржаных сухарей с 2° до 25°. Следовательно, для данной задачи: $g = 14$; $t_1 = 2$; $t_2 = 25$. Из табл. 1 мы находим, что c (удельная теплоёмкость) для ржаных сухарей равно 0,46.

Тогда:

$$Q = 14 \times 0,46 \times (25 - 2) = 148,12 \text{ Кал.}$$

С помощью этой же формулы (4) легко подсчитать и количество тепла, выделяемое тем или иным телом при его остывании. В этом случае за t_1 мы принимаем температуру в градусах Цельсия, до которой остывает тело, а за t_2 — температуру, которую имело тело до начала остывания.

Пример 3. Железная вагонетка с железными кассетами общим весом 700 кг, на которой находится 225 кг сухарей, выходит из сушильной камеры. В момент выхода вагонетка, кассеты и сухари имеют температуру +90°С. После выхода из сушилки вагонетка, кассеты и сухари остывают до +20°С (по температур в помещении). Требуется подсчитать, сколько теплоты выделяется при остывании сухарей и кассет.

Сухари и железо вагонетки с кассетами имеют различную удельную теплоёмкость (для сухарей $c = 0,46$, а для железа $c = 0,11$); задачу приходится решать отдельно для вагонетки с кассетами и для сухарей. Для вагонетки и кассет расчёт показывает, что $Q = 700 \cdot 0,11 \cdot (90 - 20) = 5390 \text{ Кал.}$ Для сухарей легко подсчитать, что $Q = 225 \cdot 0,46 \cdot (90 - 20) = 7245 \text{ Кал.}$ Всего, таким образом, выделится теплоты: $5390 + 7245 = 12635 \text{ Кал.}$

Теплосодержание

В сушильной технике очень часто приходится иметь дело с понятием теплосодержание сушильного воздуха, сушеного продукта, вагонеток и кассет — при поступлении в сушилку и при выходе из неё.

Количество тепла, находящееся в каком-либо теле, называется его теплосодержанием.

Теплосодержание (обычно обозначаемое буквой i) тела зависит от его температуры, теплоёмкости и веса и может быть выражено следующей формулой:

$$i = c \cdot g \cdot t \text{ Кал,} \quad (5)$$

где: i — теплосодержание тела в калориях,

c — удельная теплоёмкость тела,

g — вес тела в кг,

t — температура тела в °С, отсчитываемая от 0°.

Теплосодержание тела, имеющего температуру ниже 0°, при этом будет характеризоваться числом со знаком минус (отрицательной величиной). Поэтому правильнее было бы при определении теплосодержания тела выражать его температуру в градусах абсолютной шкалы (см. формулу 3). Тогда всякое тело, как бы низка ни была его температура, характеризовалось бы положительной величиной теплосодержания. Нолю было бы равно теплосодержание тела, имеющего недостижимо низкую температуру — 273°С. Поскольку в технике чаще имеют дело с телами, температура которых выше 0°, постольку и принято температуру тела при подъёме его теплосодержания выражать в градусах не абсолютной шкалы, а шкалы Цельсия.

Пример. Деревянная кассета весом 5,5 кг выходит из сушилки с температурой 85°. Каково при этом её теплосодержание?

Из задачи мы имеем, что $g = 5,5$; $t = 85$. Из табл. 1 находим, что $c = 0,45$. Исходя из этого $i = 0,45 \cdot 5,5 \cdot 85 = 210,4 \text{ Кал.}$ При определении теплосодержания пара приходится учитывать ещё и скрытую теплоту парообразования, о которой будет сказано ниже (см. вопрос о переходе воды в парообразное состояние и о теплосодержании водяного пара).

Переход тепла от одного тела к другому

Теплота всегда стремится переходить от тела или части тела с более высокой температурой к телу или части тела с более низкой температурой. Переход тепла (теплообмен или теплопередача) может происходить тремя путями: 1) путём теплопроводности, 2) путём конвекции и 3) путём излучения.

Переход тепла путём теплопроводности. Это — переход тепла внутри тела от его более нагретых частиц к соседним, менее нагретым, частицам.

Путём теплопроводности тепло переходит и от одного тела к другому, если эти тела соприкасаются вплотную.

Примером может служить переход тепла от нагретого пода печи к ломтям хлеба, уложенным на под для сушки, или к нижней части кустика теста, посаженного на под печи для выпечки.

Теплопроводность разных тел различна и характеризуется величиной коэффициента теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности, обычно обозначаемый греческой буквой λ (лямбда), есть количество тепла в калориях, проходящего в 1 час через 1 м² поверхности материала при толщине слоя материала 1 м и разности температур обеих его поверхностей в 1°.

Для того чтобы нагляднее представить себе физический смысл коэффициента теплопроводности, мысленно представим себе, что мы, желая определить коэффициент теплопроводности какого-либо материала, вырезали из этого материала куб, каждая грань которого будет равна 1 м. Допустим теперь, что одна грань куба имеет температуру на 1° большую, чем противоположная его грань, и что эта разность температур постоянно поддерживается. Тогда тепло будет стремиться (как бы течь) от более нагретой грани куба к менее нагретой. Установится тепловой поток от более нагретой грани куба к менее нагретой. За 1 час через такой куб из исследуемого материала пройдёт определённое количество тепла. Количество калорий тепла, перешедших за час через толщу этого куба, и будет численным выражением коэффициента теплопроводности. Если бы этот куб был вырезан из железа, то за 1 час через его толщу, при оговорённых выше условиях, проходило бы 40—45 Кал.

Следовательно, для железа $\lambda = 40\text{—}45 \text{ Кал/м час } ^\circ\text{C}$. В табл. 2 мы приводим значения коэффициента теплопроводности λ для ряда материалов и продуктов, с которыми приходится сталкиваться при сооружении к эксплуатации сушилок для сухарей.

Таблица 2

Материалы и продукты	При температуре в $^\circ\text{C}$	λ (в Кал/м час $^\circ\text{C}$)
Воздух	0—200	0,020—0,032
Водяной пар	100—200	0,020—0,026
Мякиш пшеничного хлеба	—	0,214
Корка	—	0,069
Асбестовый картон	50—250	0,125—0,133
Вата стеклянная	88	0,044
Кирпич	0—40	0,45—0,82
Кирпичная кладка	0—40	0,6—0,8
Древесина сосны поперёк волокон	0—50	0,12—0,14
Древесина сосны вдоль волокон	20	0,30
Железо	30—100	40—45
Медь	20—300	332—335

Как видно из табл. 2, лучше всего проводят тепло металлы (особенно медь).

Очень плохими проводниками тепла являются воздух, пар и такие изоляционные материалы, как стеклянная вата и асбестовый картон. Дерево (особенно если тепловой поток направлен поперёк волокон) также является плохим проводником тепла. Невелика и теплопроводность хлеба, причём теплопроводность корки примерно в три раза меньше теплопроводности мякиша.

Теплопроводность материалов в зависимости от их температуры несколько меняется, почему в табл. 2 указано, при какой температуре она определена. Знание коэффициента теплопроводности необходимо для решения ряда технических задач. Используя этот коэффициент, можно, например, подсчитать количество тепла, проходящее за единицу времени через стенку (или слой) из определённого материала.

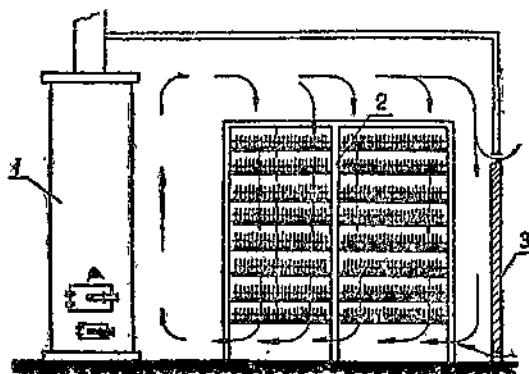


Рис. 10. Схема движения воздуха в замкнутом помещении для сушки сухарей

Для этого необходимо знать площадь и толщину стенки, температуру одной и другой её поверхности и время прохождения тепла.

Для решения таких задач можно использовать следующую формулу:

$$Q_{\text{прох}} = \lambda \frac{(t_1 - t_2) \cdot F \cdot a}{b} \text{ Кал/час;} \quad (6)$$

где: $Q_{\text{прох}}$ — количество проходящей теплоты в калориях,

λ — коэффициент теплопроводности Кал/м час °С,

t_1 — температура одной поверхности стенки в °С,

t_2 — " другой " " "

F — площадь стенки в м²,

a — время прохождения тепла в часах,

b — толщина стенки в м.

Пример. Сушильная камера ограждена кирпичной стенкой толщиной 0,25 м. Поверхность этих стенок 18 м². Температура внутренней поверхности стенок 120°; температура наружной поверхности стенок 40°. Требуется подсчитать, сколько тепла может пройти за 1 час через кирпичные ограждающие стенки.

Из табл. 2 находим, что для кирпичной кладки $\lambda = 0,6$. Используя формулу (6), можем написать;

$$Q_{\text{прох}} = \frac{0,6 \cdot (120 - 40) \cdot 18 \cdot 1}{0,25} = 3456 \text{ Кал.}$$

Таким образом, через ограждающие сушилку кирпичные стенки может пройти в час 3456 Кал.

Переход тепла путём конвекции. Такой переход тепла связан с участием в теплообмене газа или жидкости, играющих роль переносчиков тепла. Теплота при этом передаётся с помощью нагревающихся и перемещающихся частичек газа или жидкости.

В сушильной технике широко используется передача тепла путём конвекции с помощью воздуха. Перемещение при этом (циркуляция) воздуха может быть либо естественным, либо принудительным.

В качестве примера передачи тепла конвекцией с использованием естественной циркуляции воздуха приводим схему сушки сухарей в замкнутом помещении (рис. 10), обогреваемом печью. Циркуляция воздуха в таком помещении происходит следующим образом. Воздух, соприкасаясь с поверхностью печи 1, нагревается, поднимается вдоль поверхности печи в верхнюю часть помещения. Соприкасаясь с ломтиками хлеба, находящимися на полках стеллажа 2, тёплый воздух затрачивает

тепло на испарение влаги из хлеба, охлаждается, становится вследствие этого более тяжёлым и опускается вниз, проходя через ряды ломтей. Остывший воздух снова нагревается у печи, делается вследствие этого более лёгким, поднимается вверх и, таким образом, непрерывно циркулирует внутри помещения. Часть воздуха при этом уходит из помещения через неплотности (щель) над дверью 3. Соответствующая часть свежего сухого и холодного воздуха засасывается в помещение в щель под дверью. Направление движения воздуха при этом на рисунке показано стрелками. В этом примере тепло передаётся от печи сохнущим сухарям путём конвекции с помощью естественно циркулирующего воздуха.

Примером переноса тепла путём конвекции с помощью принудительно циркулирующего воздуха может служить любая вентиляционная сушилка, в которой сушильный воздух вентилятором просасывается через калорифер и затем прогоняется через сушильную камеру. При этом частички воздуха, просасываемого вентилятором через калорифер, соприкасаются с нагретыми теплоотдающими поверхностями калорифера и в нагретом состоянии нагнетаются вентилятором в сушильную камеру.

В сушильной камере нагретый воздух затрачивает своё тепло на процесс испарения влаги из сушимого продукта, охлаждаясь при этом. И здесь передача тепла от калорифера в сушильную камеру осуществляется конвекцией с помощью движущихся частичек воздуха. Однако движение (циркуляция) воздуха в отличие от примера, приведённого выше, происходит в результате не того, что частички воздуха, нагреваясь, делаются лёгкими и поэтому стремятся вверх, после же остывания, делаясь более тяжёлыми, опускаются вниз, а в результате работы вентилятора, просасывающего воздух сквозь калорифер и прогоняющего его затем через сушильную камеру.

Переход (передача) тепла лучеиспусканием. Лучеиспусканием называется отдача тепла нагретым телом в виде лучистой энергии.

Лучистая энергия, встречаясь с другим телом, в зависимости от свойств этого тела, либо поглощается этим телом, нагревая его, либо отражается от поверхности тела (так же, как луч света отражается зеркалом или гладкой металлической поверхностью), либо проходит сквозь тело, не нагревая его.

Газы, в том числе и воздух, хорошо пропускают лучистую теплоту, почти не нагреваясь при этом. Именно поэтому лучистая энергия раскалённого солнца доходит до поверхности земного шара, пронизывая всю толщу земной атмосферы (воздушной оболочки, окружающей земной шар).

Тела, хорошо пропускающие лучистую энергию, называют теплопрозрачными. Когда говорят, что воздух теплопрозрачен, следует иметь в виду, что это относится к сухому воздуху. Пары воды обладают уже заметной способностью поглощения и излучения лучистой теплоты. Поэтому, чем больше влагосодержание воздуха, тем меньше его теплопрозрачность.

Твёрдые тела, как правило, не прозрачны для лучистой энергии, а в той или иной степени поглощают и отражают её.

Нагретое тело тем больше излучает тепла, чем выше его температура, чем более оно раскалено (количество лучистой энергии, излучаемой нагретым телом, пропорционально четвёртой степени абсолютной температуры этого тела).

Лучистая теплота играет большую роль при выпечке хлеба, являясь при этом основным способом передачи тепла куску теста от свода и стенок пекарной камеры.

В сушильной технике лучеиспускание может играть большую роль как положительную, ускоряя сушку, так иногда и отрицательную, приводя к подгоранию сухарей.

Лучистая энергия при поглощении её каким-либо телом, переходит в тепло и нагревает это тело, независимо от температуры слоя воздуха, который отделяет тело, излучающее тепло, от тела, воспринимающего излучение.

Если мы вернёмся к примеру сушки сухарей, иллюстрированному схемой, приведенной на рис. 10, то увидим, что крайние ряды ломтей, расположенные на краю стеллажа, обращённом к печи, могут получать тепло не только конвекцией, с помощью естественной циркуляции воздуха, но и прямым излучением нагретой поверхности печи. Поэтому сухари, расположенные на этом краю стеллажа, сохнут скорее всей остальной партии, не подвергающейся действию лучеиспускания поверхности печи.

Теплоотдача и теплопередача. В сушильной технике часто возникает необходимость подсчёта количества тепла, теряемого сушильной камерой через ограждающие её стенки.

Процесс перехода тепла от нагретого сушильного воздуха к стенке сушильной камеры и от стенки сушильной камеры к окружающему воздуху называется **теплоотдачей**. Весь же процесс перехода тепла от сушильного воздуха через стенку сушильной камеры к окружающему воздуху называется **теплопередачей**.

Теплоотдача от влажного сушильного воздуха к ограждающей стенке и от стенки к окружающему воздуху является сложным явлением и включает переход тепла от воздуха к стенке и от стенки к воздуху и конвекцией, и лучеиспусканием, и в какой-то мере и теплопроводностью.

Теплоотдача от воздуха к стенке и от стенки к окружающему воздуху, помимо площади стенки и разности температур стенки и воздуха, зависит от скорости воздуха, от влажности его, влияющей на его теплопроводность и лучеиспускающую способность, и от характера (шероховатости) поверхности стенки.

Для характеристики теплоотдачи от воздуха к стенке, или от стенки к воздуху используют понятие коэффициента теплоотдачи, обычно обозначаемого греческой буквой α (альфа).

Коэффициент теплоотдачи равен количеству тепла, отдаваемому (или воспринимаемому) одним квадратным метром поверхности стенки в течение часа, при разности температур между стенкой и тепловоспринимающей (или теплоотдающей) средой, равной одному градусу Цельсия.

Количество тепла, отдаваемого воздухом стенке (или стенкой возду-ху), может быть определено, исходя из следующей формулы:

$$Q_{отд.} = \alpha \cdot F \cdot (t_1 - t_2) \text{ Кал/час,} \quad (7)$$

где: $Q_{отд.}$ — количество тепла, отдаваемого воздухом стенке или стенкой окружающему воздуху за 1 час., в калориях,

α — коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке (или от стенки к воздуху) в $\text{Кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$,

F — площадь поверхности стенки в м^2 ,

t_1 — температура в $^\circ\text{C}$ воздуха (теплоотдача от воздуха к стенке) или поверхности стенки (отдача тепла стенкой воздуху),

t_2 — температура в $^\circ\text{C}$ поверхности стенки (теплоотдача от воздуха к стенке) или воздуха (отдача тепла стенкой воздуху).

При теплопередаче через стенку от сушильного воздуха к окружающему воздуху мы будем иметь дело с двумя значениями коэффициента теплоотдачи α_1 и α_2 . Значение α_1 будет характеризовать величину коэффициента теплоотдачи от сушильного воздуха к окружающей стенке; значение же α_2 будет характеризовать коэффициент теплоотдачи от стенки к окружающему воздуху.

В расчёте теплопередачи через стенку придётся учитывать, что через толщу стенки тепло проходит путём теплопроводности. Количество тепла, проходящее через единицу площади стенки, будет поэтому зависеть от толщины стенки b и от коэффициента её теплопроводности λ .

Для характеристики теплопередачи через стенку используют понятие общего коэффициента теплопередачи, обычно обозначаемого буквой K .

Общий коэффициент теплопередачи отражает и коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке α_1 , и толщину b , и теплопроводность λ стенки, и коэффициент теплоотдачи от стенки окружающему воздуху α_2 и может быть выражен следующей формулой:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ Кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где: K — общий коэффициент теплопередачи в калориях на один квадратный метр поверхности стенки в час, при разности температур воздуха по обе стороны стенки, равной 1°C ,

α_1 — коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке,

b — толщина стенки в м,

λ — коэффициент теплопроводности стенки в $\text{Кал/м час } ^\circ\text{C}$,

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху.

Для определения потери тепла теплопередачей через стенку может быть использована следующая формула:

$$Q = K \cdot F \cdot (t_1 - t_2) \text{ Кал/час}, \quad (9)$$

где: Q — количество тепла в калориях, теряемое теплопередачей через стенку в час,

F — поверхность стенки в м^2 ,

t_1 — температура воздуха в $^\circ\text{C}$ по ту сторону стенки, где она выше,

t_2 — температура воздуха в $^\circ\text{C}$ по ту сторону стенки, где она ниже.

Пример. Требуется подсчитать часовую потерю тепла Q через боковые кирпичные стенки сушильной камеры при условии, что поверхность кирпичных стен сушильной камеры $F = 40 \text{ м}^2$,

толщина кирпичных стенок $b = 0,25 \text{ м}$,

температура сушильного воздуха $t_1 = 100^\circ$,

температура окружающего воздуха $t_2 = 15^\circ$,

коэффициент теплоотдачи от сушильного воздуха к стенке $\alpha_1 = 9,5 \text{ Кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$,

коэффициент теплопроводности кирпичной кладки $\lambda = 0,6 \text{ Кал/м час } ^\circ\text{C}$,

коэффициент теплоотдачи от стенки к окружающему воздуху $\alpha_2 = 6,5 \text{ Кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.

Используя формулу (8), находим:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{9,5} + \frac{0,25}{0,6} + \frac{1}{6,5}} = 1,48 \text{ Кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}.$$

С помощью формулы (9) устанавливаем, что:

$$Q = K \cdot F \cdot (t_1 - t_2) = 1,48 \cdot 40 (100 - 15) = 5032 \text{ Кал/час}.$$

Таким путём может быть подсчитана теплопередача через стенку из любого материала, если по обе стороны этой стенки находятся (как в нашем примере) водяной пар и воздух (в паровых воздухоподогревателях — калориферах), топочные газы и воздух (в огневом калорифере), топочные газы и вода (в экономайзере), и т. п.

Для проведения этих подсчётов нужно лишь знать значение коэффициентов теплоотдачи от более нагретой среды к стенке (α_1) и от стенки к другой менее нагретой, воспринимающей тепло через стенку, среде (α_2).

Для подсчёта значений коэффициентов α_1 и α_2 для разных сред, разного материала и свойств поверхности стенки, разной скорости и характера движения сред около поверхности стенки, с отдельным учётом теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием существует большое количество специальных формул, приводимых в специальных руководствах

по теплопередаче [6] и основам сушильного дела [7] и [8], к которым мы и отсылаем интересующихся этим вопросом.

В случае, если стенка многослойная, из разных материалов, нужно знать и учитывать толщину и теплопроводность всех отдельных слоёв стенки.

Свойства газов

В сушильной технике газообразные тела играют большую роль. Достаточно упомянуть о воздухе и парах воды. Превращение влаги сушимого продукта с помощью нагретого воздуха в парообразное состояние и удаление этим же воздухом испарившейся из продукта влаги составляет основу сушильного процесса. Прежде чем перейти к характеристике свойств воздуха и водяного пара, мы остановимся на некоторых общих свойствах газов.

Показатели состояния газа

Основными показателями состояния, или параметрами, газа являются объём, давление и температура газа.

Объём газа. Объём, занимаемый газом (воздухом, паром или другим газообразным телом), в технике принято измерять в кубических метрах.

Удельный объём газа. Удельным объёмом газа называют объём в кубических метрах одного килограмма газа.

В формулах удельный объём газа обычно обозначают V .

Определять удельный объём газа можно с помощью следующей формулы:

$$V = \frac{A}{g} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (10)$$

где A — объём данного количества газа в м^3 ,
 g — вес данного количества газа в кг .

Удельный вес газа. В сушильной технике часто используют и понятие удельного веса газа.

Удельным весом газа считают вес в килограммах одного кубического метра газа.

Удельный вес в формулах принято обозначать греческой буквой γ (гамма).

Понятие удельного веса газа может быть выражено следующей формулой:

$$\gamma = \frac{g}{A} \text{ кг/м}^3, \quad (11)$$

где g — вес газа в кг ,
 A — объём газа в м^3 .

Из формул (10) и (11) легко установить, что удельный вес и удельный объём газа — величины обратные, т. е.

$$\gamma = \frac{1}{V}, \quad (12)$$

$$V = \frac{1}{\gamma} \quad (13)$$

Давление газа. Давление какого-либо тела на поверхность другого тела зависит от веса тела и площади той поверхности, на которую это тело давит своим весом. Чем больше вес тела и чем меньше площадь поверхности, на которую оно давит, тем больше давление, оказываемое на единицу площади.

Так например, если мы возьмём тело весом 100 кг , имеющее форму куба, каждая грань которого имеет площадь $10 \times 10 = 100 \text{ см}^2$, и по-

ложим это тело на стол, то такое тело будет давить на каждый квадратный сантиметр поверхности стола весом в 1 кг. Если мы положим на это тело кубической формы ещё два таких тела (такой же формы и такого же веса), то на ту же поверхность стола (100 см²) будет давить уже втрое больший груз — 300 кг, а на каждый квадратный сантиметр поверхности стола будет оказано давление уже не в 1 кг, а в 3 кг.

Газы также имеют определённый вес и поэтому также способны оказывать давление. Земной шар окружён слоем воздуха, носящим название атмосферы. Этот слой воздуха своей тяжестью давит на поверхность земли и на всё, что на ней находится.

Давление на предметы, находящиеся на земле, воздух оказывает не только сверху, но и со всех сторон. На каждый квадратный сантиметр поверхности воздух давит весом примерно в 1 кг. В определённых температурных условиях на определённой высоте по отношению

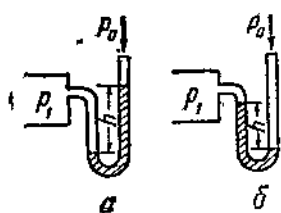


Рис. 11. Схема уравнивания давления столбом жидкости:

а—при давлении (p_1) более атмосферного (p_0); б—при давлении (p_1) менее атмосферного (p_0)

к уровню моря и при определённом — нормальном — состоянии воздуха это давление равно 1,033 кг на квадратный сантиметр (1,033 кг/см²).

Это давление принято считать за единицу и называть физической, или нормальной, атмосферой. Атмосферное давление — давление воздуха земной атмосферы, в зависимости от ряда условий, может в известных пределах изменяться. В технике за единицу давления принимают так называемую техническую атмосферу, которая соответствует давлению 1 кг/см².

Давление газа или пара может быть изменено высотой столба жидкости, уравнивающего данное давление.

Так, если в сосуде (рис. 11, а) давление p_1 больше атмосферного p_0 , то жидкость в правом колене трубки, присоединённой к сосуду, поднимается. Разница уровней h в правом и левом коленях трубки определяется по формуле:

$$h = \frac{p_1 - p_0}{\gamma} \quad (14)$$

где: γ — удельный вес жидкости.

Из формулы (14) видно, что высота подъёма жидкости тем больше, чем больше разность давлений ($p_1 - p_0$) и чем меньше удельный вес жидкости. От площади сечения трубки высота h не зависит.

Высота h , соответствующая разности давлений ($p_1 - p_0$) в одну техническую атмосферу, равна: для ртути — 736 мм, для воды — 10 м.

Таким образом, давление одной атмосферы соответствует высоте 10 м в. ст., или 736 мм рт. столба. Если давление в сосуде p_1 будет меньше атмосферного p_0 , то жидкость поднимается в левом колене трубки (см. рис. 11, б).

В этом случае высота h будет характеризовать, на сколько давление в сосуде p_1 меньше атмосферного давления p_0 , и будет служить мерой разрежения или, как иногда говорят, вакуума воздуха (или другого газа), находящегося в сосуде.

Давлению в 1 физическую атмосферу (1,033 кг/см²) соответствует высота ртутного столба в 760 мм. Это давление в сушильной технике принимается в качестве нормального давления воздуха.

Для измерения атмосферного давления воздуха обычно применяются барометры. С помощью их давление воздуха измеряется в миллиметрах ртутного столба.

Для измерения давлений выше атмосферного служат **манометры**. Эти приборы выражают давление в технических атмосферах (в кг/см^2) и показывают измеряемое давление больше атмосферного. При атмосферном давлении стрелка манометра стоит на ноле. Манометр поэтому показывает так называемое избыточное давление (избыток давления над атмосферным).

Наконец, для измерения разрежения (давлений менее атмосферного) применяются **вакуумметры**. Вакуумметры обычно выражают разрежение в миллиметрах ртутного столба.

Следует различать:

- абсолютное (полное) давление газа — $P_{\text{абс}}$,
- избыточное (манометрическое) давление газа, показываемое манометром, — $P_{\text{ман}}$,
- барометрическое давление воздуха, показываемое барометром, — $P_{\text{бар}}$,
- разрежение, показываемое вакуумметром, — $P_{\text{вак}}$.

При давлении больше атмосферного:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} + P_{\text{ман}}. \quad (15)$$

При давлении, больше атмосферного:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}}. \quad (16)$$

Для разных пересчётов следует иметь в виду, что:

1 техническая атмосфера (1 кг/см^2) = 735,6 мм рт. ст. = 10 м в. ст. = 0,968 физической атмосферы.

1 физическая атмосфера = 1,033 кг/см^2 (1,033 технической атмосферы) = 760 мм рт. ст. = 10,333 м в. ст.

1 мм рт. ст. = 0,00136 технической атмосферы = 0,001316 физической атмосферы = 0,01359 м в. ст.

1 м в. ст. = 0,1 технической атмосферы = 0,0968 физической атмосферы = 73,56 мм рт. ст.

Температура газа. Температура газов обозначается в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или в градусах абсолютной шкалы температур, нулем которой является — 273°C .

Зависимость между объёмом, давлением и температурой газа. Между основными показателями состояния (параметрами) газа — его объёмом, давлением и температурой — существует определённая зависимость.

Зависимость между давлением и объёмом газа при постоянной его температуре характеризуется законом Бойля-Мариотта, который на основании обратной пропорциональности между объёмом определённого весового количества газа и давлением устанавливает, что произведение данного количества газа на занимаемый им объём при неизменной температуре есть величина постоянная.

Закон Бойля-Мариотта может быть выражен следующей формулой:

$$p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2 = p_3 \cdot A_3 = \text{const} \cdot (\text{постоянной величины}), \quad (17)$$

где: p_1, p_2, p_3 — давления определённого количества газа,

A_1, A_2, A_3 — соответственные объёмы этих же количеств газа, при неизменной температуре.

Из закона Бойля-Мариотта следует, что при уменьшении давления газа должен соответствующе увеличиваться его объём, т. е. во сколько раз уменьшается давление, во столько же раз увеличивается его объём.

Зависимость объёма газа от его давления можно изобразить в виде диаграммы (рис. 12). Пусть определённое количество этого газа при давлении, равном 2 атмосферам, занимает объём 2 м^3 .

Следовательно, для заданного количества газа $p \cdot A = 2 \cdot 2 = 4$ — величина постоянная.

Исходя из этого, легко установить, что:

при	$p = 0,5$	$A = 8$	$(0,5 \cdot 8 = 4)$
"	$p = 1$	$A = 4$	$(1 \cdot 4 = 4)$
"	$p = 2$	$A = 2$	$(2 \cdot 2 = 4)$
"	$p = 4$	$A = 1$	$(4 \cdot 1 = 4)$
"	$p = 8$	$A = 0,5$	$(8 \cdot 0,5 = 4)$

Диаграмма на рис. 12 построена на основании этих цифр следующим образом: на бумаге нанесены две пересекающиеся под прямым углом линии, называемые осями координат. Горизонтальная линия, называемая осью абсцисс, или осью иксов, разделена на равные отрезки, каждый из которых соответствует изменению давления на одну атмосферу.

Точка пересечения горизонтальной линии с вертикальной принята за точку, соответствующую давлению, равному нулю. Точка, отстоящая

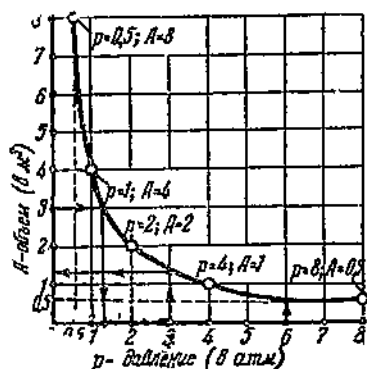


Рис. 12. График зависимости объема газа от его давления (при постоянной температуре)

на один отрезок направо от точки нуля, соответствует давлению в 1 атм, следующая направо точка — давлению в 2 атм, и т. д. Если бы мы захотели найти на этой линии точки, соответствующие десятым долям атмосферы, то каждый отрезок нужно было бы разделить еще на десять частей.

Вертикальная линия, называемая осью ординат, или осью икреков, на диаграмме является масштабом объема газа. Каждый отрезок этой линии соответствует 1 м³ объема газа. Если из точек, соответствующих единице масштаба на оси абсцисс, проведем вертикальные линии, а из точек масштаба на оси ординат — горизонтальные линии, то мы полу-

чим приведенную на рис. 12 так называемую координатную сетку. С помощью такой сетки легко определять зависимость между какими-либо двумя величинами, в нашем примере — между давлением и объемом газа.

Давлению в 1 атм соответствует объем в 4 м³. Найдём на координатной сетке точку, соответствующую такому объёму и давлению. Для нахождения этой точки мы из точки на оси абсцисс 1 атм будем двигаться вверх по вертикальной линии до пересечения с горизонтальной линией, выходящей из точки 4 м³. На месте пересечения этих линий получаем точку, в которой $p = 1$ и $A = 4$ м³. Таким же образом получаем на координатной сетке точки, соответствующие $p = 0,5$ и $A = 8$; $p = 2$ и $A = 2$; $p = 4$ и $A = 1$ и $p = 8$ и $A = 0,5$. Таким способом можно нанести точки соответствующему любому другому давлению и объёму газа, о котором идёт речь в нашем примере.

Если точки, нанесённые на координатную сетку, соединить плавной линией, получается кривая зависимости объема газа от давления. Пользуясь такой кривой, легко, без каких-либо подсчётов, найти объём газа, соответствующий какому-либо произвольному его давлению.

Так например, если мы захотим найти объём нашего газа, соответствующий 3 атм давления, то для этого из точки 3 атм давления проводим (см. рис. 12) вертикальную линию до пересечения с кривой. Из этой точки пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат. По масштабу на оси ординат мы легко находим, что давлению нашего газа в 3 атм соответствует объём 1,33 м³. Таким же образом можно по любому значению объёма нашего газа найти со-

ответствующее значение его давления. Для этого надо из соответствующей точки оси ординат провести горизонтальную линию до пересечения с кривой и из места этого пересечения провести вертикальную линию до пересечения с осью абсцисс, которое и покажет величину соответствующего давления. В порядке упражнения предлагаем читателям с помощью графика, приведённого на рис. 12, найти давления данного газа, соответствующие объёму 3 и 6 м³, и объёмы этого газа, соответствующие его давлению в 5 и 2,5 атм.

Зависимость между объёмом и температурой газа при постоянном (неизменном) его давлении характеризуется законом Гей-Люссака.

При нагревании все тела, в том числе и газообразные, расширяются, увеличивая при этом свой объём. Величина прироста единицы объёма тела при повышении его температуры на 1° носит название коэффициента объёмного расширения тела β .

Изменение объёма данного весового количества газа при постоянном его давлении и нагревании от 0° до температуры t (в °C) выразится, согласно закону Гей-Люссака, следующей формулой:

$$A = A_0 \cdot (1 + \beta t), \quad (18)$$

где: A — объём данного весового количества газа при t° ,

A_0 — объём того же количества газа при 0°,

t — температура газа после нагревания в °C,

β — коэффициент объёмного расширения газа.

Большим количеством очень точных опытов было установлено, что коэффициент объёмного расширения, при постоянном давлении газа одинаков для всех газов и равен $\frac{1}{273}$, или 0,00367.

Из этого следует, что объём любого газа при нагревании увеличится на $\frac{1}{273}$ часть своего первоначального объёма при 0° C, а при охлаждении на 1° уменьшится на $\frac{1}{273}$ этого объёма.

Поэтому при нагревании удельный вес воздуха (вес 1 м³ в кг) уменьшается, а при охлаждении увеличивается.

Именно эта разница в удельном весе воздуха при разной его температуре, при которой более тёплый воздух легче менее тёплого, и вызывает естественную циркуляцию воздуха при передаче тепла конвекцией. Более тёплый и, следовательно, более лёгкий воздух стремится подниматься вверх, а остывший, более тяжёлый, опускается вниз.

При — 273,1° объём газа становится бесконечно-малым и как бы исчезает. Поэтому-то эта наименьшая, практически недостижимая, температура и принята за абсолютный ноль, от которого и отсчитывается шкала абсолютных температур.

Исходя из такого численного значения коэффициента объёмного расширения газов β , равного $\frac{1}{273}$, или 0,00367, формулу (18) можно выразить так:

$$A = A_0 (1 + 0,00367 \cdot t), \quad (18_1)$$

где обозначения те же, что и в формуле (18).

Пример. Известно, что определённое весовое количество газа занимает при 0° объём, равный 1 м³. Каков будет объём этого количества газа при 10 и 30°?

По формуле (18₁) имеем, что при нагревании до 10° $A = 1(1 + 0,00367 \cdot 10) = 1,0367$ м³, а при нагревании до 30° $A = 1(1 + 0,00367 \cdot 30) = 1,1101$ м³.

Зависимость между объёмом, давлением и температурой газа при изменении температуры и давления характеризуется так называемым уравнением состояния газа, объединяющим в себе законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Уравнение состояния газа часто называют ещё характеристическим уравнением Клапейрона. Уравнение состояния газа может быть выражено в виде следующей формулы:

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (19)$$

где: p — давление газа (в кг м^2),
 v — удельный объём газа (в $\text{м}^3/\text{кг}$) при давлении p ,
 T — температура газа в градусах абсолютной шкалы температур [$T = (273 + t)^\circ\text{C}$],
 R — величина, носящая название «газовой постоянной»; для каждого газа R есть вполне определённая постоянная величина.

Так например, для воздуха $R = 29,26$, для водяных паров — 47,00, и т. д.

Для g кг газа уравнение (19) принимает следующий вид:

$$p \cdot A = g \cdot R \cdot T, \quad (19_1)$$

где: g — вес данного количества газа в кг,
 A — объём данного количества газа в м^3 ,
 p , R и T — имеют те же значения, что и в формуле (19).

Газовые смеси

Закон Дальтона. Смеси газов (паров или газов и паров), не вступающих между собой в химические реакции, подчиняются закону Дальтона. Согласно закону Дальтона, при нахождении в одном и том же объёме смеси нескольких газов каждый газ находится в таком же состоянии, как если бы он один занимал этот объём.

Давления отдельных газов, входящих в состав газовой смеси, носят название парциальных (частичных) давлений.

Согласно закону Дальтона, полное давление смеси газов в определённом объёме равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси. Это положение можно выразить в виде следующей формулы:

$$p = p_1 + p_2 + p_3, \quad (20)$$

где: p — полное давление смеси газов,
 p_1, p_2, p_3 — парциальные давления входящих в состав смеси газов 1, 2 и 3.

Если мы примем следующие обозначения:

g — вес смеси газов в кг,
 $g_1, g_2, g_3 \dots$ — вес отдельных газов, входящих в смесь, в кг,
 R — газовая постоянная смеси газов,
 $R_1, R_2, R_3 \dots$ — газовая постоянная отдельных газов,
 t — температура смеси газов в $^\circ\text{C}$,
 $t_1, t_2, t_3 \dots$ — температура отдельных газов,
 γ — удельный вес смеси газов в $\text{кг}/\text{м}^3$,
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots$ — удельный вес отдельных газов (в $\text{кг}/\text{м}^3$) при соответствующих парциальных давлениях,
 c — теплоёмкость смеси газов,
 $c_1, c_2, c_3 \dots$ — теплоёмкость отдельных газов,
 i — теплосодержание смеси газов,
 $i_1, i_2, i_3 \dots$ — теплосодержание отдельных газов,

то для газовой смеси мы можем использовать следующие формулы.

Вес смеси:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 \quad (21)$$

Газовая постоянная:

$$R = \frac{R_1 \cdot g_1 + R_2 \cdot g_2 + R_3 \cdot g_3}{g} \quad (22)$$

Теплоёмкость:

$$c = \frac{c_1 \cdot g_1 + c_2 \cdot g_2 + c_3 \cdot g_3}{g} \quad (23)$$

Температура:

$$t = \frac{t_1 \cdot c_1 \cdot g_1 + t_2 \cdot c_2 \cdot g_2 + t_3 \cdot c_3 \cdot g_3}{c_1 \cdot g_1 + c_2 \cdot g_2 + c_3 \cdot g_3} \quad (24)$$

Теплосодержание:

$$i = \frac{i_1 \cdot g_1 + i_2 \cdot g_2 + i_3 \cdot g_3}{g} \quad (25)$$

Удельный вес:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \quad (26)$$

Парциальное давление отдельного газа, входящего в смесь, можно найти по следующей формуле:

$$p_1 = p \cdot \frac{g_1 \cdot R_1}{g_2 \cdot R} \quad (27)$$

где обозначения те же, что и в формулах (20), (21) и (22).

Вышеприведённые соотношения между показателями состояния газовой смеси и составляющих эту смесь газов широко используются в расчётах, связанных с сушкой сухарей, так как воздух, при посредстве которого осуществляется процесс сушки, представляет собой смесь сухого воздуха и паров воды, подчиняющуюся закону Дальтона, а, следовательно, и формулам 20—27.

Ниже мы сначала отдельно остановимся на свойствах сухого воздуха и водяного пара, а затем лишь на свойствах влажного воздуха.

Сухой воздух. Сухой воздух представляет смесь из ряда газов. Воздух в основном состоит из азота (75,5 весовых процентов), кислорода (23,1 весовых процентов) и в очень незначительной части из аргона, углекислого газа, неона и гелия. Состав сухого воздуха постоянен, поэтому с точки зрения использования в сушильном процессе мы можем его рассматривать как газ, обладающий вполне определёнными и постоянными свойствами.

Теплоёмкость сухого воздуха в пределах температур и давления, которые он имеет в сушилках для сухарей, для технических расчётов может быть принята равной 0,24.

Удельный вес сухого воздуха при 0° и давлении, равном 760 мм рт. ст., равен 1,293 кг/м³.

Удельный объём сухого воздуха при этих же условиях равен 0,7726 м³/кг.

Газовая постоянная сухого воздуха равна 29,27.

Сухой воздух в пределах тех температур и давления, которые он может иметь при сушке сухарей, может рассматриваться при разных технических расчётах как газ, подчиняющийся законам Бойля-Мариотта и Гей-Люссака и уравнению состояния газа (уравнению Клапейрона).

В заключение отметим ещё раз, что в естественных условиях и в сушильной технике с действительно сухим воздухом встречаться не приходится, так как здесь воздух всегда содержит то или иное количество водяных паров.

Приведённые же выше данные по сухому воздуху нужны будут нам для того, чтобы, исходя из закона Дальтона и формул 20—27, можно было подсчитать показатели влажного воздуха при любом содержании в воздухе паров воды.

Превращение влаги сушеного продукта в пар — испарение воды, переход её при этом из жидкого состояния в газообразное, является основой сушильного процесса.

Прежде чем характеризовать превращение воды из жидкого состояния в газообразное, мы выясним, что такое твёрдое, жидкое и газообразное состояние тел и при каких условиях совершается переход физических тел из одного состояния в другое.

Газообразное, жидкое и твёрдое состояния тел

Все физические тела как твёрдые, так и жидкие и газообразные состоят из мельчайших материальных частичек, называемых молекулами.

В газах молекулы находятся на очень больших расстояниях одна от другой, намного превышающих размеры самих молекул. Силы сцепления между молекулами газа очень малы, поэтому молекулы газа непрерывно движутся в самых различных направлениях. При этом беспорядочном движении молекулы, сталкиваясь между собой, отскакивают одна от другой; наталкиваясь на стенки сосуда, в котором находится газ, молекулы газа отскакивают и от них. Чем более нагрет газ, тем с большей скоростью движутся его молекулы, тем большей энергией движения (кинетической энергией) обладает каждая молекула газа; поэтому беспорядочное движение молекул газа носит название теплового движения. В жидкости расстояние между молекулами значительно меньше и между ними начинают действовать силы взаимного сцепления, не позволяющие молекулам удалиться одна от другой в их тепловом движении далее определённого предела.

Вследствие беспорядочного теплового перемещения молекул жидкость, сохраняя свой объём, будет принимать форму сосуда, в котором она находится. Скорость и энергия движения молекул жидкости также тем больше, чем выше её температура.

Силы сцепления между частицами твёрдого тела столь велики, что молекулы уже не перемещаются, а занимают определённое положение по отношению друг к другу. Молекулы и в твёрдом теле не вполне неподвижны — они совершают небольшие колебательные движения относительно своего среднего положения. Вследствие того, что среднее положение молекул относительно друг друга неизменно, твёрдые тела сохраняют не только свой объём, но и свою форму.

Переход тела из твёрдого в жидкое состояние. При нагревании твёрдого тела энергия движения молекул будет увеличиваться, и молекулы начнут всё более и более отходить в тепловом движении одна от другой. При определённой температуре энергия движения молекул твёрдого тела делается столь большой, что, преодолевая силы сцепления, молекулы начинают совершать в пределах объёма тела беспорядочное тепловое движение, и тело из твёрдого состояния переходит при этом в жидкое. Процесс этот носит название плавления. Температура, при которой происходит переход данного тела из твёрдого состояния в жидкое, называется температурой плавления этого тела. Температура остаётся постоянной все время, пока происходит процесс плавления.

Примером перехода твёрдого тела в жидкое (плавления) может служить таяние льда. Вода при этом переходит из твёрдого состояния в жидкое. Температура таяния льда, как нами уже отмечалось выше, равна 0° и принята за точку ноля в шкале Цельсия. Процесс плавления твёрдого тела требует затраты определённого количества тепла. Тепло при этом затрачивается не только на нагревание тела до температуры

его плавления. Если мы нагреем тело до температуры его плавления и после этого прекратим дальнейшее нагревание (дальнейшую передачу тепла плавящемуся телу), то процесс плавления прекратится. Для того чтобы процесс плавления тела при температуре его плавления продолжался, приходится затрачивать определённое количество тепла на преодоление сил сцепления молекул твёрдого тела и на приведение этих молекул в состояние беспорядочного теплового движения.

Теплоту, необходимую для перевода при температуре плавления 1 кг данного тела в жидкое состояние, называют удельной теплотой плавления данного тела. Выражают удельную теплоту плавления в калориях на один килограмм расплавляемого тела.

Переход тела из жидкого состояния в газообразное. Переход тела из жидкого состояния в газообразное носит название испарения жидкости.

Простейшим случаем испарения жидкости будет испарение со свободной поверхности этой жидкости, налитой в какой-либо открытый сосуд. Как мы уже отмечали выше, жидкость представляет собой скопление молекул беспорядочно движущихся во всех направлениях в пределах объёма жидкости.

Однако среди огромного количества молекул жидкости всегда находится некоторое количество молекул, обладающих большей энергией и скоростью движения, чем остальные. Эти молекулы, попадая с большой скоростью в поверхностный слой жидкости, способны преодолеть сцепление частичек жидкости и поэтому могут как бы выскочить, вылететь за пределы её. Часть молекул, обладающих наибольшим запасом тепловой энергии движения, будет при испарении теряться жидкостью, понижая, таким образом, и количество тепловой энергии и, следовательно, температуру жидкости. Отсюда следует, что процесс испарения жидкости происходит с затратой известного количества тепла. Если мы хотим температуру испаряющейся жидкости поддерживать на определённом постоянном уровне, то мы должны передавать этой жидкости определённое количество тепла. Теплота, затрачиваемая на процесс испарения, на преодоление испаряющимися частицами какой-либо жидкости сил сцепления её с другими частицами и противодействия воздуха (или паров жидкости) над поверхностью жидкости, носит название теплоты испарения данной жидкости. Количество теплоты (в калориях), которое нужно затратить, чтобы при постоянной температуре перевести один килограмм жидкости в газообразное состояние, называется удельной теплотой испарения. Чем более нагрета жидкость, чем выше её температура, тем выше кинетическая энергия её молекул, тем больше скорость их движения, тем меньше, очевидно, дополнительная затрата тепла, необходимая для приведения этих молекул в состояние, при котором они могут преодолеть силы сцепления и испариться. Для воды зависимость удельной теплоты испарения от температуры характеризуется цифрами, приведёнными в табл. 3.

Таблица 3

Температура в °C	0	50	100	150	200	250	300	350	374
Удельная теплота испарения в Кал/кг . . .	595	568	539,4	506	464,2	408,1	330,2	210,3	0

При 374° удельная теплота испарения воды равна нулю. Это значит, что при этой температуре вся вода, без дополнительного подвода тепла,

превратится в пар. Поэтому для воды температура 374° является критической температурой.

При превращении пара в жидкость, носящем название конденсации пара, теплота испарения вновь выделяется. Этим свойством водяного пара широко пользуются в технике.

Испарение жидкости со свободной поверхности будет таким образом происходить при любой температуре. Чем выше будет температура жидкости, тем больше будет энергия движения её частиц, тем интенсивнее будет идти процесс её испарения с поверхности.

Насыщенный пар. Налейм жидкость, например воду, в плоский сосуд и закроем его каким-либо опрокинутым сосудом: над поверхностью жидкости будет ограниченное воздушное пространство. Часть молекул с поверхности жидкости будет испаряться — «вылетать» из жидкости и в виде пара постепенно переходить в пространство над поверхностью воды. Однако молекулы пара над поверхностью жидкости, сталкиваясь между собою и отскакивая от стенок сосуда, продолжают беспорядочное тепловое движение во всех направлениях, в том числе и по направлению к поверхности жидкости. Поэтому часть молекул пара всегда будет как бы «влетать» обратно в воду, переходя опять в жидкость. Первое время число молекул, «вылетающих» из жидкости, будет больше, нежели число молекул, «влетающих» обратно в жидкость. Поэтому количество молекул пара над жидкостью будет постепенно увеличиваться. Так будет происходить до тех пор, пока количество молекул «вылетающих» из жидкости и «влетающих» в неё обратно не будет одинаково, т. е. пока наступит подвижное равновесие, при котором количество молекул пара над жидкостью, а следовательно, и парциальное давление пара, будет постоянным.

В этом случае пар, как говорят, насыщает пространство над жидкостью. Такой пар называют насыщенным паром. Если увеличить количество молекул пара над жидкостью сверх насыщающего пространство количества, то тогда количество молекул, «влетающих» в жидкость, увеличится и будет превышать количество молекул «вылетающих» из жидкости, вследствие чего количество молекул и давление пара над жидкостью будет постепенно снижаться до тех пор, пока опять не будет достигнуто то же самое равновесие насыщения.

Таким образом, плотность и давление насыщенного пара над поверхностью жидкости есть величина постоянная для данной температуры жидкости.

Повышение температуры жидкости повышает скорость и энергию движения в ней молекул и поэтому количество молекул, способных преодолеть силы сцепления с другими молекулами жидкости и «вылетать» за пределы жидкости (испаряться), увеличивается. Вследствие этого увеличивается и количество молекул, находящихся над поверхностью жидкости в виде молекул пара, увеличивается и парциальное давление пара, насыщенного при этой температуре. Следовательно, чем выше температура жидкости, тем больше соответствующее ей парциальное давление насыщенного пара.

В табл. 4 мы приводим цифры, характеризующие зависимость между температурой испарения воды и соответствующим ей давлением насыщенного водяного пара.

Таблица 4

Температура испаряющейся воды в $^{\circ}\text{C}$	0	50	100	150	200	250	300	350	374
Давление насыщенного пара в атмосферах . .	0,0062	0,1258	1,0333	4,855	15,85	40,55	87,63	168,64	225,05

Испарение воды со свободной поверхности

Испарение воды со свободной поверхности зависит от ряда факторов. Чем больше поверхность испарения, тем больше воды испарится в единицу времени. Чем меньше парциальное давление паров воды в воздухе над поверхностью воды, тем больше молекул воды будут в виде пара покидать её поверхностный слой, тем скорее будет идти её испарение. Повышение температуры воды, усиливая энергию движения её частиц, также увеличивает их испарение из поверхностного слоя воды.

При увеличении скорости воздуха над поверхностью воды также ускоряется испарение воды с поверхности, уменьшается толщина неподвижного слоя (плёнки) воздуха над поверхностью воды, и оказываемое им сопротивление проходящим через этот слой молекулам испаряющейся воды понижается.

Небезразлично также и атмосферное (барометрическое) давление. Чем меньше барометрическое давление воздуха, тем меньше сопротивление встречают испаряющиеся молекулы воды.

Учитывая эти моменты, Дальтон в 1803 г. пришёл к выводу, что скорость испарения воды со свободной поверхности может быть характеризована следующей формулой:

$$M = \beta \cdot \frac{760}{b} \cdot (p_s - p_0) \text{ кг/м}^2 \text{ час}, \quad (28)$$

где: M — количество воды (в кг), испаряющейся за час со свободной поверхности воды, площадью в 1 м^2

β — коэффициент испарения,

b — барометрическое давление воздуха (в мм рт. ст.),

p_s — давление насыщенного пара при температуре испаряющейся жидкости,

p_0 — парциальное давление пара в воздухе (в мм рт. ст.).

Величина коэффициента β зависит от скорости и направления потока воздуха над поверхностью воды, от размера сосуда, в котором находится испаряющаяся вода, и ряда других моментов.

При движении потока воздуха параллельно поверхности воды величина коэффициента испарения β в основном будет зависеть от скорости воздуха.

Каррье, например, приводит следующие данные (табл. 5):

Скорость воздуха в 1 м/сек . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Значения β в $\text{кг/м}^2 \text{ час}$. .	0,033	0,048	0,062	0,079	0,094	0,109	0,124	0,139

Как видно из табл. 5, чем больше скорость воздуха, тем больше численное значение коэффициента испарения.

Пример 1. Подсчитать, сколько воды испарится за 1 час с 1 м^2 поверхности воды при условии, что температура воды 50° , барометрическое давление 745 мм рт. ст. , парциальное давление пара в воздухе 11 мм рт. ст. и скорость воздуха, движущегося параллельно поверхности воды, 2 м/сек.

По таблице находим, что $\beta = 0,048$. Из условий задачи видно, что $b = 745$.

Давление пара, насыщенного при 50° , по табл. 4 равно $0,1258 \text{ кг/см}^2$. Для выражения этого давления в мм рт. ст. пользуемся равенством: давление $1 \text{ мм рт. ст.} = 0,00136 \text{ кг/см}^2$; исходя из этого, находим для нашего примера:

$$p_s = \frac{0,1258}{0,00136} = 92,5 \text{ мм рт. ст.}$$

$$p_0 = 11 \text{ мм рт. ст. по заданию.}$$

Тогда в соответствии с формулой (28) пишем:

$$M = \beta \cdot \frac{760}{b} (p_s - p_0) = 0,048 \cdot \frac{760}{745} \cdot (92,5 - 11) = 3,99 \text{ кг/м}^2 \text{ час.}$$

Испарение воды при кипении

Из повседневного опыта хорошо известно, что если воду налить в открытый сосуд и подвергать этот сосуд нагреванию, то вода начнёт нагреваться и затем закипит.

При нормальном атмосферном давлении в 760 мм рт. ст. вода будет кипеть при 100° (выше мы уже об этом упоминали, говоря о шкале Цельсия). Прямое наблюдение за кипением воды убеждает нас в том, что вода при этом постепенно переходит в пар. Об этом говорит нам струйка пара, вырывающаяся из носика кипящего чайника. Об этом мы можем судить также по тому, что количество кипящей воды в нагреваемом сосуде постепенно уменьшается и наступает, наконец, момент, когда вся вода, находившаяся в сосуде, будет превращена в пар. Если мы будем нагревать и кипятить воду в стеклянном прозрачном сосуде, то сможем наблюдать следующую картину: вскоре после начала нагревания сосуда на более сильно нагретом дне начнут выделяться мелкие пузырьки. Пузырьки эти постепенно отрываются от дна и на поверхности воды исчезают. Сначала, таким образом, выделяется и удаляется из воды находившийся в ней воздух. Затем, когда дно сосуда прогреется (до температуры примерно в 100°), на его поверхности начинают образовываться пузырьки пара, которые быстро отрываются от дна и начинают подниматься вверх. До поверхности эти пузырьки в первое время не доходят, так как встречают на своем пути более холодные слои воды, температура которых на много ниже; пар, отдавая свое тепло этим слоям воды, превращается из газообразного состояния в жидкое (конденсируется). Одновременно с этим можно наблюдать конвекционные вертикальные токи более нагретых слоев воды от дна сосуда к его поверхности. Вследствие обоих этих явлений вода постепенно нагревается, и, наконец, вся масса воды достигает температуры 100°. При этом во всей массе воды, и особенно в её части, прилегающей ко дну сосуда, бурно образуются крупные пузыри пара, быстро поднимающиеся вверх, где пары воды переходят в воздух. Таким образом, при кипении воды парообразование происходит во всей её массе.

Температура кипения сохраняется в кипящей жидкости до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар.

Зависимость между температурой кипения и давлением. При изменении давления меняется и температура кипения. Чем больше давление над поверхностью кипящей жидкости, тем выше температура её кипения.

Для воды зависимость температуры кипения от давления иллюстрируется цифрами, приведёнными в табл. 6.

Таблица 6

Давление в технических атмосферах	0,01	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	200	225
Температура кипения в °C	6,6	32,5	45,4	80,9	99,1	151,1	179,0	262,7	309,5	364,2	374

Как видно из табл. 6, при давлении в 0,1 атм. вода кипит при 45,4°, а при давлении в 10 атм. — при 179°. Из вышесказанного следует, что между испарением воды с поверхности и испарением воды при кипении имеется существенная разница.

Испарение воды с поверхности может происходить и при температурах ниже точки кипения. При этом в парообразовании участвуют

только молекулы поверхностного слоя воды. Кипение же воды происходит только при определённой температуре, зависящей от давления воздуха или пара над поверхностью воды. Парообразование при кипении происходит во всей массе кипящей воды. Энергия движения нагретых до температуры кипения молекул воды достаточна для того, чтобы сцепление с окружающими молекулами воды преодолевали не только молекулы поверхностного слоя воды, но и наиболее быстро движущиеся молекулы во всей массе воды.

Температура насыщенного пара над поверхностью кипящей воды равна температуре воды при данном давлении. Так будет обстоять дело до тех пор, пока вся вода не испарится (или пока водяной пар не будет лишён возможности сообщаться с кипящей водой).

Если мы будем продолжать нагревание сосуда, в котором находится пар, и после того, как испарилась вся вода, или после того, как пар был лишён возможности сообщаться с кипящей жидкостью, то температура пара будет повышаться и превысит температуру насыщенного пара, имеющего температуру кипения при данном давлении.

Такой процесс носит название перегрева пара, а пар, имеющий температуру выше температуры кипения при данном давлении, называется перегретым паром.

Теплосодержание водяного пара

Теплосодержание (i) пара характеризует общее количество тепла, затраченного на превращение в пар одного килограмма воды, имеющей температуру 0° .

Для насыщенного пара

$$i_{н.п.} = i_v + r \text{ Кал/кг}, \quad (29)$$

где: $i_{н.п.}$ — теплосодержание насыщенного пара в калориях на 1 кг пара;

i_v — теплосодержание воды, нагретой с 0°C до температуры кипения (испарения).

При данном давлении:

$$i_v = c_v \cdot t_{кип.}$$

где: c_v — теплоёмкость воды, принимаемая за 1,

$t_{кип.}$ — температура кипения при данном давлении,

r — удельная теплота парообразования, находящаяся в зависимости от температуры испарения (см. табл. 3).

Для перегретого пара теплосодержание будет характеризоваться следующей формулой:

$$i_{п.п.} = i_{н.п.} + c_{п.п.} (t_{п.п.} - t_{н.п.}), \quad (30)$$

где: $i_{п.п.}$ — теплосодержание перегретого пара в Кал/кг,

$i_{н.п.}$ — теплосодержание насыщенного пара, находимое по формуле (29),

$c_{п.п.}$ — удельная теплоёмкость перегретого пара в пределах температур

$$(t_{п.п.} - t_{н.п.})$$

В интервале температур $100 - 500^\circ$ величина $c_{п.п.}$ изменяется в пределах от 0,464 до 0,488.

Для примерных технических подсчётов часто принимают, исходя из этого, что $c_{п.п.} \approx 0,5$,

$t_{п.п.}$ — температура перегретого пара,

$t_{н.п.}$ — температура насыщенного пара.

Ниже, в табл. 7, мы приводим цифры, характеризующие зависимость между давлением, температурой, удельным весом, теплосодержанием воды, перегретой от 0° до температуры насыщения, удельной теплотой испарения и теплосодержанием сухого насыщенного пара.

Насыщенный пар

Давление в кг/см ² $P_{\text{абс}}$	Темпера- тура $t_{\text{н.п}}$	Удельный вес пара в кг/м ³ $\gamma_{\text{н.п}}$	Теплосодержа- ние воды, на- гретой до $t_{\text{н.п}}$ в Кал/кг $i_{\text{в}}$	Удельная теп- лота испарения в Кал/кг r	Теплосодер- жание пара в Кал/кг $i_{\text{н.п}}$
0,01	6,69	0,00760	6,7	593,1	599,8
0,02	17,2	0,01465	17,2	587,2	604,4
0,03	23,8	0,02149	23,8	583,5	607,3
0,04	28,6	0,02820	28,6	580,8	609,4
0,05	32,5	0,03481	32,5	578,6	611,1
0,06	35,8	0,04134	35,8	576,8	61,6
0,08	41,2	0,05420	41,1	573,8	614,9
0,10	45,4	0,06687	45,4	571,4	616,8
0,20	59,7	0,1283	59,6	563,2	622,8
0,30	68,7	0,1876	68,6	558,0	626,6
0,40	75,4	0,2456	75,4	554,1	629,5
0,50	80,9	0,3027	80,8	550,9	631,7
0,60	85,5	0,3591	85,4	548,1	633,5
0,70	89,5	0,4148	89,4	545,7	635,1
0,80	93,0	0,4699	93,0	543,5	636,5
0,90	96,2	0,5247	96,2	541,9	637,8
1,0	99,1	0,5790	99,1	539,8	638,9
2,0	119,6	1,107	119,9	526,6	646,5
3,0	132,9	1,619	133,4	517,6	651,0
4,0	142,9	2,121	143,6	510,5	654,1
5,0	151,1	2,616	152,1	504,5	656,6
6,0	158,1	3,106	159,3	499,2	658,5
7,0	164,2	3,594	165,6	494,4	660,0
8,0	169,6	4,079	171,3	490,0	661,3
9,0	174,5	4,562	176,4	486,0	662,4
10,0	179,0	5,043	181,2	482,1	663,3
20,0	211,4	9,862	215,9	451,9	667,8

Пример. Найти теплосодержание перегретого пара, имеющего температуру 200°, зная, что температура насыщения этого пара при 2 атм давления была равна 119,6°. Исходя из формулы (30) и данных, приведённых в табл. 7, пишем:

$$i_{\text{п.п}} = i_{\text{н.п}} + c_{\text{п.п}} (t_{\text{п.п}} - t_{\text{н.п}}) = 646,5 + 0,5(200 - 119,6) = 686,7 \text{ Кал/кг.}$$

Влажный воздух

Воздух в атмосферных условиях и в условиях сушильного производства никогда не бывает совершенно сухим, а всегда содержит некоторое количество водяных паров. Поэтому барометрическое давление воздуха, в соответствии с законом Дальтона и формулой (20), представляет сумму парциальных давлений сухого воздуха и содержащегося в нём водяного пара:

$$P_{\text{б}} = P_{\text{с.в}} + P_{\text{п}}. \quad (31)$$

где: $P_{\text{б}}$ — барометрическое давление воздуха,

$P_{\text{с.в}}$ — парциальное давление сухого воздуха,

$P_{\text{п}}$ — парциальное давление пара, содержащегося в воздухе.

Существенно отметить, что влажный воздух при температурах ниже 200° можно рассматривать как идеальный газ, подчиняющийся вышеприведённым законам Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и характеристическому уравнению Клапейрона.

Для характеристики влажности воздуха в сушильной технике используют понятия абсолютной влажности воздуха, относительной влажности воздуха и влагосодержания воздуха.

Абсолютная влажность воздуха

Абсолютной влажностью воздуха называется вес водяного пара (в килограммах), содержащегося в одном кубическом метре влажного воздуха. В соответствии с законом Дальтона водяной пар, содержащийся во влажном воздухе, занимает тот же объём, что и влажный воздух. Следовательно, абсолютная влажность влажного воздуха равна удельному весу γ водяного пара, содержащегося в нём (вспомним, что в соответствии с формулой (11) $\gamma = \frac{g}{A} \text{ кг/м}^3$). Исходя из этого, абсолютная влажность воздуха может быть обозначена, как γ_n .

Согласно уравнению Клапейрона ($p_v = RT$) и уравнению (13) $v = \frac{1}{\gamma}$, можно написать $\frac{p_n}{\gamma_n} = R_n \cdot T$, откуда:

$$\gamma_n = \frac{p_n}{R_n \cdot T} \text{ кг/м}^3, \quad (32)$$

где: γ_n — удельный вес пара во влажном воздухе, или абсолютная влажность влажного воздуха,

R_n — газовая постоянная водяного пара, содержащегося во влажном воздухе,

T — абсолютная температура влажного воздуха,

p_n — парциальное давление пара во влажном воздухе.

Насыщение воздуха водяными парами при определённой температуре возможно только до известного предела, при котором парциальное давление пара во влажном воздухе p_n будет равно парциальному давлению пара, насыщенного при данной температуре ($p_{n,n}$).

Дальнейшее увлажнение воздуха при понижении его температуры привело бы к превращению пара в воду — к образованию во влажном воздухе мельчайших капелек воды — тумана, а затем и к прямому выпадению влаги в капельно-жидком состоянии.

Исходя из этого, влагоёмкость воздуха определяется полным насыщением его парами воды при данной температуре.

Относительная влажность воздуха

Атмосферный воздух редко бывает полностью насыщен парами воды. Для характеристики степени насыщения воздуха парами воды используется понятие относительной влажности воздуха. Относительной влажностью воздуха (обычно обозначаемой греческой буквой φ , (фи)), называется отношение веса водяных паров, содержащихся в одном кубическом метре влажного воздуха, к весу максимального (наибольшего) количества водяных паров, которое может содержаться в одном кубическом метре воздуха при той же температуре и том же давлении. Следовательно, относительная влажность воздуха есть отношение между его абсолютной влажностью и влагоёмкостью:

$$\varphi = \frac{\gamma_n}{\gamma_{n,n}}, \quad (33)$$

где: φ — относительная влажность воздуха,

γ_n — удельный вес пара, содержащегося в воздухе (в кг/м^3), или же абсолютная влажность воздуха,

$\gamma_{n,n}$ — удельный вес пара, насыщенного при той же температуре и том же давлении пара (в кг/м^3), или же максимально возможное содержание пара в воздухе при данной температуре и данном давлении, или влагоёмкость воздуха.

Обычно относительную влажность воздуха выражают в процентах. Тогда:

$$\varphi = \frac{\gamma_n \cdot 100}{\gamma_{н.п}} \% \quad (33,а)$$

Из характеристического уравнения Клапейрона следует, что:

$$\gamma_n = \frac{p_n}{R_n \cdot T} \quad \text{и} \quad \gamma_{н.п} = \frac{p_{н.п}}{R_{н.п} \cdot T},$$

поскольку $R_n = R_{н.п} = 47,00$ мы, исходя из вышенаписанного, можем считать, что

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_{н.п}} = \frac{p_n}{p_{н.п}}, \quad \text{а следовательно, } \varphi = \frac{p_n}{p_{н.п}} \quad (34)$$

или

$$\varphi = \frac{p_n \cdot 100}{p_{н.п}} \% \quad (34,а)$$

где: p_n — парциальное давление пара, содержащегося в воздухе,

$p_{н.п}$ — парциальное давление пара, насыщенного при той же температуре и давлении воздуха.

Из формул (33) и (34) видно, что для совершенно сухого воздуха, у которого $p_n = 0$, и $\varphi = 0$, а для воздуха, насыщенного водяными парами, у которого $\gamma_n = \gamma_{н.п}$, или $p_n = p_{н.п}$, $\varphi = 1,0$, или $\varphi = 100\%$.

Величина относительной влажности воздуха является одним из основных показателей его сушильных свойств. Чем ниже величина φ , тем больше влаги способен ещё воспринять сушильный воздух.

Пример 1. При температуре 20° и барометрическом давлении $b = 745$ мм рт. ст. $p_n = 0,01431$ кг/см². Какова относительная влажность воздуха, если известно, что $p_{н.п}$ при 20° и $b = 745$ мм рт. ст. равно $0,02384$ кг/см². Согласно формуле (34, а) пишем, что

$$\varphi = \frac{p_n \cdot 100}{p_{н.п}} = \frac{0,01431 \cdot 100}{0,02384} = 60\%.$$

Пример 2. При температуре 90° и барометрическом давлении, равном 745 мм рт. ст., абсолютная влажность воздуха $\gamma_n = 0,08461$ кг/м³. Какова относительная влажность воздуха, если известно, что при этой температуре $\gamma_{н.п} = 0,42307$ кг/м³. Согласно формуле (33, а) пишем, что

$$\varphi = \frac{\gamma_n \cdot 100}{\gamma_{н.п}} = \frac{0,08461 \cdot 100}{0,42307} = 20\%.$$

Измерение относительной влажности воздуха.

В сушильной технике для измерения относительной влажности воздуха обычно используют несложный прибор, носящий название психрометра.

Психрометр в наиболее простом его виде схематически изображён на рис. 13 и состоит из двух термометров, смонтированных на общем щитке. Термометр 1, так называемый «сухой термометр», показывает температуру воздуха. Показания этого термометра в формулах и психрометрических таблицах обозначаются t_c . Термометр 2, носящий название «мокрого термометра», отличается тем, что нижний его конец, содержащий расширенную часть трубки со ртутью, покрыт чехлом из марли, опущенной в стакан с водой. С поверхности влажной марли вода испаряется. Затрата тепла на процесс испарения воды приводит к

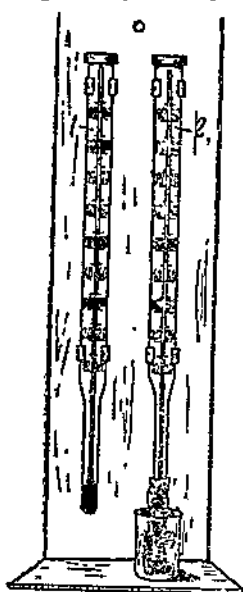


Рис. 13. Схема психрометра

охлаждению марли и накрытого ею конца термометра. Поэтому, чем сильнее идёт процесс испарения влаги из марли, тем более низкую температуру будет показывать мокрый термометр, тем больше будет разность между показаниями сухого и мокрого термометров.

Показания мокрого термометра обычно обозначают t_m . Разность между t_c и t_m ($t_c - t_m$) носит название психометрической разности.

Чем менее насыщен воздух парами воды (чем меньше его относительная влажность), тем сильнее будет идти испарение воды из марли, тем ниже будет значение t_m , тем больше будет психометрическая разность ($t_c - t_m$). И, наоборот, чем более насыщен воздух парами воды, тем ближе значение t_m к значению t_c , тем меньше психометрическая разность. При полном насыщении воздуха (при $\varphi = 100\%$) испарение влаги из марли происходить не будет, t_m будет равно t_c и разность ($t_c - t_m$) будет равна нулю. Именно поэтому психометр можно использовать для измерения относительной влажности воздуха, судя о ней по величине ($t_c - t_m$) при определённой величине t_c . Для нахождения по этим величинам относительной влажности воздуха используют специальные психометрические таблицы или диаграммы. Скорость воздуха, омывающего психометр, в известной мере влияет на степень испарения влаги и, следовательно, на показания мокрого термометра. Поэтому психометрические таблицы и диаграммы обычно учитывают этот момент (см. приложение 2).

В приложениях мы приводим психометрические диаграммы для воздуха, движущегося со скоростью 2,0 м/сек (приложение 1, Б, В и Г) и диаграмму величины погрешности ($t_c - t_m$) при различных значениях t_m в зависимости от скорости движения воздуха (приложение 1, А).

Предлагаем читателю с помощью этих диаграмм найти значение φ в нижеприводимых примерах.

Пример 1. $t_c = 30^\circ$, $t_m = 16^\circ$, $v = 2$ м/сек. Найти значение φ .

Психометрическая разность ($t_c - t_m$) = $30 - 16 = 14^\circ$.

Исходя из этого, по диаграмме В находим пересечение кривой психометрической разности, отвечающей 14° , с вертикальной прямой, отвечающей значению $t_c = 30^\circ$.

Двигаясь из этой точки по горизонтали налево до пересечения с осью ординат, на которой нанесен масштаб значений φ , находим, что в данном примере $\varphi = 20\%$.

Пример 2. $t_c = 25^\circ$, $t_m = 20^\circ$, $v = 0,25$ м/сек. Найти φ .

С помощью диаграммы 1, А находим, что при скорости движения воздуха $v = 2,0$ м/сек, для которой и составлены диаграммы Б, В и Г, при $t_m = 20^\circ$ ошибка в значении ($t_c - t_m$) равна 2%.

Используя эту же диаграмму (А) находим, что при $v = 0,25$ м/сек эта ошибка равна 7%.

Поэтому, чтобы иметь право использовать для нахождения φ диаграмму В, мы должны исходить из значения ($t_c - t_m$), равного не 5° , а $\frac{100 + (7-2)}{100} \cdot 5 = 5,25^\circ$; для этого значения ($t_c - t_m$) мы с помощью диаграммы В находим $\varphi = 60,5\%$.

Влагосодержание воздуха. В расчётах сушильных установок большую роль играет понятие о влагосодержании воздуха. Влагосодержанием воздуха называется количество водяных паров (в граммах), приходящихся на один килограмм сухого воздуха. В формулах, таблицах и на графиках влагосодержание воздуха обычно обозначают буквой d .

Если в определённом объёме воздуха содержится g_n кг водяных паров и $g_{с.в.}$ кг сухого воздуха, то влагосодержание определяется по формуле:

$$d = \frac{g_n \cdot 1000}{g_{с.в.}} \text{ г/кг сухого воздуха.} \quad (35)$$

Используя характеристическое уравнение Клапейрона и закон Дальтона, можно влагосодержание воздуха выразить следующей формулой:

$$d = 622 \frac{\varphi \cdot p_{н.п}}{b - \varphi \cdot p_{н.п}} \text{ г/кг сухого воздуха.} \quad (35, \text{в})$$

где:

d — влагосодержание, в г/кг сухого воздуха,

φ — относительная влажность как отношение $\frac{p_{п}}{p_{н.п}}$,

$p_{н.п}$ — парциальное давление пара, насыщающего воздух при данной его температуре и данном барометрическом давлении,

b — барометрическое давление.

Удельный вес влажного воздуха

По закону Дальтона, в соответствии с формулой (26),

$$\gamma_{в.в.} = \gamma_{с.в.} + \gamma_{в.п} \text{ кг/м}^3, \quad (36)$$

где: $\gamma_{в.в.}$ — удельный вес влажного воздуха,

$\gamma_{с.в.}$ — удельный вес сухого воздуха,

$\gamma_{в.п.}$ — удельный вес водяных паров, содержащихся в воздухе.

Так как водяной пар легче сухого воздуха, то при одном и том же барометрическом давлении и одной и той же температуре удельный вес воздуха снижается по мере увеличения количества в нём водяных паров. Следовательно, чем воздух влажнее (при постоянных барометрическом давлении и температуре), тем он легче.

Исходя из характеристического уравнения Клапейрона, удельный вес влажного воздуха можно характеризовать формулой:

$$\gamma_{в.в.} = \frac{b}{R_{с.в.} \cdot T} - \frac{\varphi \cdot p_{н.п}}{T} \left(\frac{1}{R_{с.в.}} - \frac{1}{R_{п.п.}} \right) \text{ кг/м}^3 \quad (37)$$

где: $\gamma_{в.в.}$ — удельный вес влажного воздуха,

b — барометрическое давление (в мм рт. ст.),

$R_{с.в.}$ — характеристическая постоянная сухого воздуха = 29,26,

T — абсолютная температура воздуха в градусах шкалы абсолютных температур,

φ — относительная влажность как отношение $\frac{p_{п}}{p_{н.п}}$,

$p_{н.п.}$ — парциальное давление водяных паров, насыщающих воздух при температуре T и давлении b ,

$R_{п.п.}$ — характеристическая постоянная водяных паров = 47,0.

После подстановки вместо $R_{с.в.}$ и $R_{п.п.}$ их численных значений формула (37) принимает следующий вид:

$$\gamma_{в.в.} = 0,0341 \frac{b}{T} - 0,0129 \frac{\varphi p_{н.п.}}{T} \text{ кг/м}^3. \quad (37, \text{а})$$

Из формулы (37, а) ясно видно, что чем больше относительная влажность φ , тем больше будет значение второго члена правой части формулы, тем меньше будет значение $\gamma_{в.в.}$, тем легче будет воздух.

Теплосодержание влажного воздуха

Теплосодержание влажного воздуха, как и его влагосодержание, для удобства расчётов принято относить к 1 кг сухого воздуха. Вспомним, что 1 кг сухого воздуха соответствует $(1 + 0,001 d)$ кг влажного воздуха, где d — влагосодержание в г/кг сухого воздуха.

Теплосодержание влажного воздуха принято обозначать буквами I или i .

Исходя из закона Дальтона и формулы (25), мы можем написать, что

$$i_{в.в} = i_{с.в} + i_n \text{ Кал/кг сухого воздуха,} \quad (38)$$

где: $i_{в.в}$ — теплосодержание влажного воздуха в Кал/кг сухого воздуха,

$i_{с.в}$ — теплосодержание сухого воздуха в Кал/кг,

i_n — теплосодержание паров, содержащихся в 1 кг сухого воздуха, в кал/кг.

Расшифровывая $i_{с.в}$ и i_n , можем написать:

$$i_{в.в} = c_{с.в} \cdot 1 \cdot t + \frac{d}{1000} (r + c_n \cdot t) \text{ Кал/кг сухого воздуха,} \quad (38,а)$$

где: $c_{с.в}$ — удельная теплоёмкость сухого воздуха, равная 0,24 для температуры воздуха в пределах до 200 °.

r — теплота испарения 1 кг воды,

c_n — теплоёмкость пара для влажного воздуха $\approx 0,47$,

t — температура влажного воздуха в °С.

Подставляя вместо $c_{с.в}$, c_n и r их численные значения, получим:

$$i_{в.в} = 0,24 \cdot t + \frac{d}{1000} (595 + 0,47 \cdot t) \text{ Кал/кг сухого воздуха} \quad (38,б)$$

Пр и м е р. Определить теплосодержание влажного воздуха, имеющего температуру $t = 60^\circ$ и влагосодержание $d = 40$ г/кг сухого воздуха. В соответствии с формулой (38,б) пишем:

$$i_{в.в} = 0,24 \cdot t + \frac{d}{1000} (595 + 0,47 \cdot t) = 0,24 \cdot 60 + \frac{40}{1000} (595 + 0,47 \cdot 60) = 39,33$$

Кал/кг сухого воздуха.

В приложении 2 мы приводим таблицу влагосодержаний и теплосодержаний влажного воздуха на 1 кг сухого воздуха при $b = 745$ мм рт. ст. и температурах от -15 до $+800^\circ$ и φ в пределах от 0 до 100%.

Предлагаем читателю с помощью этой таблицы найти i и d для влажного воздуха:

- 1) имеющего $t = 20^\circ$ и $\varphi = 60\%$,
- 2) " $t = 60^\circ$ и $\varphi = 30\%$,
- 3) " $t = 140^\circ$ и $\varphi = 10\%$.

i — d -диаграмма

Во время сушильного процесса влагосодержание, относительная влажность, температура и теплосодержание сушильного воздуха изменятся. С помощью вышеприведённых формул путём ряда расчётов можно определить, как меняются вышеперечисленные показатели влажного воздуха в процессе сушки. Сильно упрощаются эти расчёты использованием готовых справочных таблиц (типа таблиц, приведённых в приложении 1).

Однако наиболее быстро и без производства каких-либо расчётов можно определить изменения d , i , t и φ сушильного воздуха с помощью так называемой i — d -диаграммы.

Эта диаграмма (см. приложение 3), разработанная в СССР в 1918 г. проф. Рамзиным и дополненная затем несколько сушильной лабораторией Всесоюзного теплотехнического института, получила в настоящее время всеобщее распространение.

Все расчёты для построения i — d -диаграммы производят, исходя из барометрического давления 745 мм рт. ст. Это давление соответствует среднегодовому давлению в центральной полосе СССР. Ввиду незначительного изменения влажного воздуха при других показаниях барометра диаграммой i — d практически можно пользоваться и при давлении воздуха, отличном от 745 мм рт. ст.

Диаграмма i — d построена в косоугольных координатах. Угол между осями координат для температур в пределах до 200° принят равным 135° (малая диаграмма), для более высоких температур—равным 120° (большая диаграмма). Для процессов, связанных с сушкой сухарей, где температура воздуха не превышает 200°, пользуются малой диаграммой, описанием которой мы и ограничиваемся здесь. Выбор косоугольной системы координат вместо обычной прямоугольной вызывается тем обстоятельством, что кривые относительной влажности φ получаются в случае применения прямоугольной системы координат в виде густого пучка, что затрудняет пользование диаграммой.

В диаграмме i — d на оси абсцисс отложено влагосодержание d воздуха, на оси ординат — теплосодержание i . Для удобства пользования диаграммой — для упрощения

отсчётов — на ней нанесена вспомогательная горизонтальная ось, на которой отложены значения влагосодержания (см. рис. 14, а).

Разберём построение $i-d$ -диаграммы.

Для более ясного представления о построении диаграммы на рис. 14, а, б, в, г, д, е приведены графики отдельных групп линий, составляющих вместе диаграмму в целом.

На диаграмме $i-d$ имеются следующие группы линий: 1) постоянного тепло-содержания ($i = \text{const}$), 2) постоянных температур ($t = \text{const}$), 3) постоянного вла-госодержания ($d = \text{const}$) и 4) постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$).

Кроме того, внизу диаграммы нанесена линия давления водяных паров p_n в зави-симости от влагосодержания.

На рис. 14, б проведены параллельно оси абсцисс (под углом в 135° к оси орди-нат) линии постоянного теплосодержания (так называемые адиабаты). Все точки, рас-положенные на одной и той же линии, имеют постоянное теплосодержание ($i = \text{const}$), численное содержание которого нанесено на диаграмме на обоих концах линий.

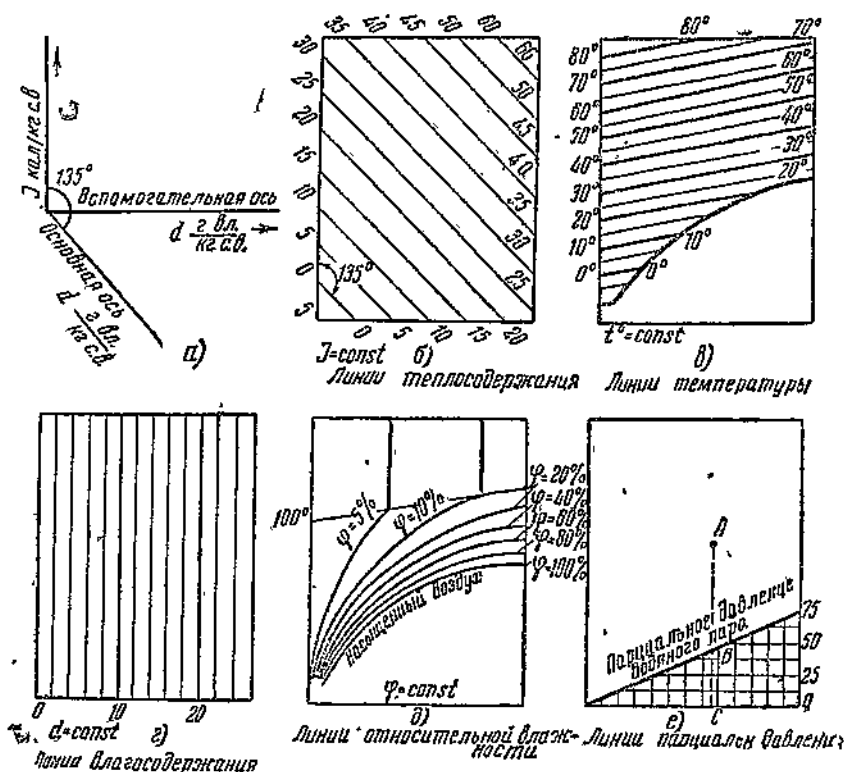


Рис. 14. Элементы построения $i-d$ -диаграммы

На рис. 14, в проведена вторая группа параллельных между собой линий постоян-ных температур (изотерм). Все точки каждой линии имеют постоянную температуру ($t = \text{const}$), значение которой также нанесено на обоих концах линий.

На рис. 14, г показаны линии постоянного влагосодержания ($d = \text{const}$). Эти линии параллельны оси ординат, и шкала их значений нанесена на оси абсцисс соответствую-щей линии ($i=0$). (Как указывалось выше, для удобства отсчётов эта шкала перене-сена на вспомогательную горизонтальную ось).

На рис. 14, д нанесен пучок кривых постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$) в пределах от 5 до 100%. Эти кривые построены путём соединения ряда точек с различным влагосодержанием, соответствующих различным изотермам при одной той же относительной влажности. Кривая ($\varphi = 100\%$) является предельной кривой насыщения и при переходе по этой кривой от высокой температуры к более низкой происходит конденсация водяных паров влажного воздуха.

При переходе от низких температур к более высоким по достижении темпера-туры кипения воды при данном барометрическом давлении (около 100°) кривые ($\varphi = \text{const}$) резко меняют направление и идут вверх почти по вертикали. На диа-грамме ниже линии $\varphi=100\%$ расположена область, характеризующая состояние влаж-ного воздуха как смеси, содержащей воздух, насыщенный пар и воду в капельно-жидком состоянии.

На рис. 14, *е* проведена линия парциальных давлений водяного пара. Для определения парциального давления водяного пара для произвольной точки *A* нужно из этой точки диаграммы провести вертикальную линию, параллельную оси ординат, и тогда отрезок *B—O* даст давление в мм рт. ст.

Помимо перечисленных линий на *i—d*-диаграмму нанесен ряд прямых пунктирных линий одинакового направления с линиями ($i = \text{const}$), но с некоторыми отклонениями. Назначение этих линий будет указано при рассмотрении работы психрометра.

Полную диаграмму *i—d*, представляющую совмещение всех пяти приведенных диаграмм, см. в приложении 3.

На примере покажем использование этой *i—d*-диаграммы для определения по двум известным параметрам воздуха остальных основных показателей, характеризующих этот воздух.

Пример. Известно, что у данного воздуха $\varphi = 30\%$, а $d = 28$ г/кг сухого воздуха. Найти с помощью *i—d*-диаграммы остальные параметры этого воздуха.

Состояние данного воздуха характеризуется на *i—d*-диаграмме точкой пересечения двух линий: кривой $\varphi = \text{const} = 30\%$ и вертикальной прямой $d = \text{const} = 28$ г/кг сухого воздуха. На прилагаемой *i—d*-диаграмме эта точка обозначена буквой *A*.

По положению точки *A* относительно линий постоянной температуры легко определить, что температура данного воздуха равна $52,5^\circ$.

Теплосодержание данного воздуха определяется тем, что точка *A* лежит на линии $i = \text{const} = 30$ кал/кг сухого воздуха. Следовательно, теплосодержание исследуемого воздуха равно 30 кал/кг сухого воздуха.

С помощью *i—d*-диаграммы может быть определено и парциальное давление паров воды в воздухе.

Для этого из точки *A* движемся по вертикальной линии вниз. Пересечение этой линии с линией парциального давления водяного пара, произошедшее в точке *N*, и определяет нам искомое парциальное давление пара в воздухе. Для того, чтобы найти численное значение этой величины, следует из точки *N* провести вправо горизонтальную прямую. Точка пересечения этой прямой с масштабом парциальных давлений пара (в мм рт. ст.), отложенным на вертикальной оси в правом нижнем углу *i—d*-диаграммы, покажет нам, что p_a для нашего примера равно $32,4$ мм рт. ст.

Зная абсолютную величину одного деления масштаба парциальных давлений пара, на данной *i—d*-диаграмме можно легко найти численное значение p_a по величине отрезка *N—E*.

Таким образом, зная, что для исследуемого воздуха $\varphi = 30\%$ и $d = 28$ г/кг сухого воздуха, мы с помощью *i—d*-диаграммы нашли, что $t = 52,5^\circ$, $i = 30$ кал/кг сухого воздуха и $p_a = 32,4$ мм рт. ст.

Один уже только этот пример делает наглядным те преимущества, которые заключает в себе *i—d*-диаграмма. Как мы увидим из ниже приводимого, *i—d*-диаграмма может быть использована для ряда других операций.

Использование *i—d*-диаграммы для характеристики изменения состояния влажного воздуха при сушке. Во время процесса сушки параметры сушительного воздуха изменяются. Для расчёта сушильных установок важно знать, как изменяются параметры воздуха во время процесса сушки.

Рассмотрим основные процессы изменения состояния влажного воздуха.

Подогрев воздуха. При подогревании вес сухого воздуха и влаги, входящих в состав смеси, остается неизменным, т. е. влагосодержание воздуха остается постоянным. Процесс нагревания в части влагосодержания воздуха выражается равенством $d_0 = d_1 = \text{const}$,

где: d_0 — начальное влагосодержание воздуха.

d_1 — конечное влагосодержание воздуха,

На *i—d*-диаграмме процесс изображается прямой, параллельной оси ординат. Во время процесса происходит увеличение температуры воздуха t , повышение теплосодержания i , уменьшение относительной влажности φ и сохранение парциального давления водяных паров p_a . Значения всех этих параметров могут быть определены по *i—d*-диаграмме.

Пример. Пусть исходная температура воздуха $t_0 = 52,5^\circ$, а относительная влажность $\varphi_0 = 30\%$. Определить с помощью *i—d*-диаграммы значения d_0 , t_0 и p_{a0} воздуха при вышеуказанных значениях t_0 и φ_0 , а также определить параметры этого воздуха при нагревании его до $t_1 = 95^\circ$.

На *i—d*-диаграмме воздух при t_0 и φ_0 характеризуется точкой *A*. Для этой точки $d_0 = 28$ г/кг сухого воздуха;

$i = 30$ кал/кг сухого воздуха,

$p_{a0} = 32,4$ мм рт. ст.

Процессу нагрева воздуха до $t_1 = 95^\circ$ соответствует отрезок *A—B*. По точке *B*, для которой $t_1 = 95^\circ$, находим, что $\varphi = 5\%$; $d_1 = d_0 = 28$ г/кг сухого воздуха; $t_1 = 40,7$ кал/кг сухого воздуха; $p_a = p_{a0} = 32,4$ мм рт. ст.

Охлаждение воздуха. Процесс охлаждения воздуха до так называемой точки или температуры росы также характеризуется постоянством влагосодержания ($d = \text{const}$)

ипозтому на i - d -диаграмме также изображается прямой линией, параллельной оси ординат.

Как видно по i - d -диаграмме (см. линию ADC по i - d -диаграмме в приложении) относительная влажность (φ) воздуха при понижении его температуры резко возрастает до тех пор, пока воздух не станет полностью насыщенным ($\varphi=100\%$). На i - d -диаграмме этот момент соответствует точке пересечения линии ($d=\text{const}$) с линией ($\varphi=100\%$).

На прилагаемой i - d -диаграмме при охлаждении воздуха по линии ACD этот момент отмечен точкой D .

Точка пересечения этих линий называется точкой росы, а температура воздуха в этой точке — температурой росы. Эти названия объясняются тем, что дальнейшее охлаждение воздуха ниже этой температуры будет вызывать выпадение избыточной части влаги в капельно-жидком состоянии, конденсирующаяся при этом влага оседает на поверхностях, с которыми соприкасается воздух, в виде росы. При охлаждении воздуха ниже температуры росы его относительная влажность будет неизменно оставаться равной 100% ($\varphi=100\%$). Влагосодержание воздуха при этом будет снижаться вследствие того, что часть влаги будет выпадать в капельно-жидком состоянии.

Выпадение водяных паров, содержащихся в воздухе, в виде росы будет иметь место также, если мы приведём в соприкосновение с влажным воздухом, имеющим температуру выше температуры росы, поверхность, температура которой равна или ниже температуры росы. Такая поверхность будет покрываться налётом росы.

Этим именно объясняется выпадение росы летним утром, когда неостывший ещё влажный воздух соприкасается с поверхностью более остывшей растительности, или же отпотевание оконных стекол в прохладные осенние или весенние дни, когда температура поверхности оконного стекла ниже температуры росы комнатного воздуха.

Таким образом, охлаждение воздуха до температуры росы характеризуется равенством: $d_0 = d_1 = \text{const}$, а охлаждение ниже точки росы — равенством $\varphi = \text{const} = 100\%$. Охлаждение воздуха ниже температуры росы на диаграмме выражается отрезком, отложенным от точки росы влево вниз по линии ($\varphi=100\%$) до пересечения с линией ($t=\text{const}$), соответствующей конечной температуре охлаждаемого воздуха. В точке пересечения этих линий можно получить конечные параметры этого воздуха, а по разности влагосодержаний в точке росы и в конечной точке — судить о количестве влаги, выпадающей из воздуха в капельно-жидком состоянии.

Пример 1. Найти температуру росы для воздуха, соответствующего точке A на i - d -диаграмме, а также определить параметры этого воздуха, охлаждённого до температуры $t_2=45^\circ$.

Состояние воздуха при $t_2=45^\circ$ на прилагаемой i - d -диаграмме будет соответствовать ординате точки C .

По этой точке находим, что $\varphi_2=45\%$; $d_2=d_0=28$ г/кг сухого воздуха; $p_{a2}=p_{a0}=32,4$ мм рт. ст.; $i_2=28,3$ Ккал/кг сухого воздуха. Точка росы обусловливаемая пересечением линии AC с линией ($\varphi=100\%$), отмечена на прилагаемой i - d -диаграмме точкой D . Этой точке соответствует температура росы, равная 30° .

Пример 2. Для воздуха, отвечающего точке A на i - d -диаграмме, найти параметры, отвечающие состоянию его при охлаждении до $t_3=5^\circ$, определив количество влаги, выпадающей при этом в капельно-жидком состоянии.

Точка росы воздуха при этих условиях, как уже указывалось выше, отмечена на i - d -диаграмме точкой D . Для нахождения точки, соответствующей состоянию этого воздуха при 5° , мы из точки D перемещаемся по линии ($\varphi=100\%$) влево — вниз до пересечения с линией $t=\text{const}=5^\circ$. На i - d -диаграмме эта точка отмечена буквой E . По этой точке находим, что $\varphi_3=100\%$; $d_3=5,2$ г/кг сухого воздуха; $p_{a3}=6$ мм рт. ст.; $i_3=4,5$ Ккал/кг сухого воздуха. Количество влаги, выпадающей в капельно-жидком состоянии, равно: $d_2-d_3=28-5,2=22,8$ г/кг сухого воздуха.

Адиабатический процесс испарения воздухом воды. Адиабатическими называют процессы, происходящие без потерь и без дополнительного подвода тепла.

Адиабатическим может быть сушильный процесс, происходящий в так называемой теоретической сушилке, при допущении, что исходная температура сушильного материала, а следовательно, и воды в нём равна 0°C , что процесс сушки происходит исключительно за счёт тепла, вводимого в сушилку в виде теплосодержания сушильного воздуха, и что сушилка не имеет ни потерь, ни притока тепла через ограждающие её стенки и перекрытия.

В этом случае, хотя температура сушильного воздуха, испаряющего влагу и затрачивающего тепло на нагрев воды до температуры испарения и на скрытую теплоту парообразования, и будет снижаться, теплосодержание воздуха останется неизменным. Объясняется это тем, что тепло, затраченное на подогрев и испарение воды, будет сохраняться в сушильном воздухе и выразится теплосодержанием испаренных из сушильного продукта паров воды.

При этих условиях теплосодержание сушильного воздуха в процессе сушки будет неизменным ($i=\text{const}$), почему конечное теплосодержание воздуха (i_2) будет равно начальному (i_0). На i - d -диаграмме такой процесс адиабатического испарения воды воздухом выразится отрезком, направленным от точки начального состояния воздуха

направо вниз параллельно линиям ($i = \text{const}$). На $i-d$ -диаграмме примером графической характеристики адиабатического процесса испарения влаги сушильным воздухом может служить отрезок $A-F$.

Следует отметить, что в практических сушилках сушильный процесс не идет строго адиабатически как вследствие того, что продукт, поступающий в сушилку, имеет $t > 0^\circ\text{C}$ (это повышает теплосодержание воздуха), так и вследствие того, что имеют место теплотери в окружающую среду через стенки и негерметичности сушильной камеры и воздухопроводов (это понижает теплосодержание воздуха).

Пример. Определить конечное состояние поступающего в теоретическую сушилку воздуха с параметрами точки A ($t_0 = 52,5^\circ$ и $\varphi_0 = 30\%$), производящего адиабатическое испарение влаги из сушимого продукта, если конечная относительная влажность его $\varphi_k = 80\%$.

Для нахождения конечного состояния данного сушильного воздуха от точки A на линии ($i = \text{const}$) $= 30$ Кал/кг сухого воздуха откладываем отрезок до пересечения с линией ($\varphi = 80\%$). Место пересечения отмечаем точкой F , соответствующей конечному состоянию сушильного воздуха.

По точке F находим, что $t_k = 36^\circ$; $i_k = i_s = 30$ Кал/кг сухого воздуха, $d_k = 34$ г/кг сухого воздуха, $p_{hk} = 15,2$ мм рт. ст. Температура росы для этого воздуха 33° .

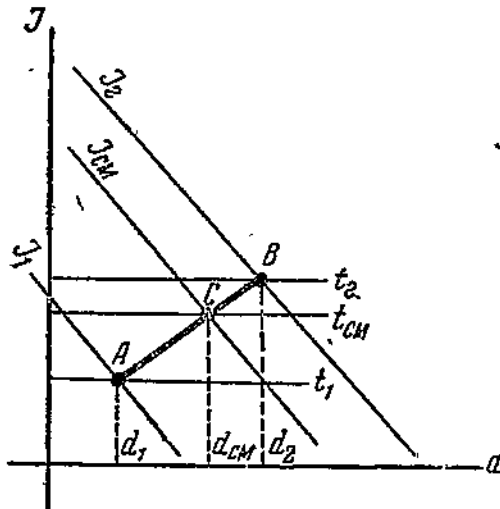


Рис. 15. Определение состояния смеси влажного воздуха с помощью $i-d$ -диаграммы

Смешение воздуха. Если смешать влажный воздух, имеющий температуру t_1 , относительную влажность φ_1 и содержащий L_1 кг сухого воздуха, с влажным воздухом температурой t_2 , относительной влажностью φ_2 и содержащий L_2 кг сухого воздуха, то образуется воздушная смесь, влагосодержание $d_{см}$ и теплосодержание $i_{см}$ которой равно

$$d_{см} = \frac{L_1 \cdot d_1 + L_2 \cdot d_2}{L_1 + L_2} \text{ г/кг сухого воздуха,} \quad (39)$$

$$i_{см} = \frac{L_1 \cdot i_1 + L_2 \cdot i_2}{L_1 + L_2} \text{ Кал/кг сухого воздуха,} \quad (40)$$

или разделив числители и знаменатели дробей на L_1 и обозначая отношение $\frac{L_2}{L_1}$ через n (кратность смешения), получим вышеприведенные соотношения в форме:

$$d_{см} = \frac{d_1 + n \cdot d_2}{n + 1} \text{ г/кг сухого воздуха,} \quad (39, а)$$

$$i_{см} = \frac{i_1 + n \cdot i_2}{n + 1} \text{ Кал/кг сухого воздуха.} \quad (40, а)$$

Преобразуя уравнение (39, а), можно написать, что

$$n = \frac{d_{см} - d_1}{d_2 - d_{см}}. \quad (39, б).$$

Состояние смеси легко найти по $i-d$ -диаграмме.

Если влажному воздуху, содержащему L_1 кг сухого воздуха и имеющему параметры i_1, t_1, φ_1 и d_1 , соответствует (рис. 15) точка A , а влажному воздуху, содержащему L_2 кг сухого воздуха, характеризуемому параметрами i_2, t_2, φ_2 и d_2 , соответствует точка B , то точка C , выражающая состояние смеси, будет находиться на прямой, соединяющей точки A и B , и определяться соотношением:

$$n = \frac{L_2}{L_1} = \frac{d_{см} - d_1}{d_2 - d_{см}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{CB}}. \quad (41)$$

Пример. Смешиваются: влажный воздух, содержащий 100 кг сухого воздуха при $t_1 = 52,5^\circ$, $\varphi_1 = 30\%$, с влажным воздухом, содержащим 200 кг сухого воздуха при $t_2 = 25^\circ$ и $\varphi_2 = 70\%$.

Определить с помощью i - d -диаграммы параметры смеси воздуха.

На прилагаемой i - d -диаграмме влажному воздуху с $t_1 = 52,5^\circ$ и $\varphi_1 = 30\%$ соответствует точка A . Воздуху с $t_2 = 25^\circ$ и $\varphi_2 = 70$ будет соответствовать точка, обозначенная на прилагаемой i - d -диаграмме буквой G . Соединяем точки A и G прямой линией. Для нахождения на этой линии точки K , характеризующей параметры состояния смеси, в соответствии с уравнением (41), пишем, что

$\frac{AK}{GK} = \frac{L_2}{L_1} = \frac{200}{100} = 2$, откуда видно, что отрезок AK должен быть вдвое больше отрезка GK . Для нахождения местоположения точки K измеряем длину отрезка AG и делим этот отрезок на 3 части. Точка K будет находиться на расстоянии двух третей длины отрезка AG от точки A .

По точке K находим параметры состояния воздушной смеси.

Температура — $t_{см} = 34^\circ$.

Относительная влажность $\varphi_{см} = 53\%$.

Влагосодержание $d_{см} = 18,6$ г/кг сухого воздуха.

Теплосодержание $i_{см} = 19,7$ кал/кг сухого воздуха.

Парциальное давление водяных паров — $p_{см} = 21,5$ мм рт. ст.

Температура росы — $t_{росы см} = 23^\circ$.

Определение с помощью i - d -диаграммы параметров влажного воздуха по показаниям сухого и мокрого термометров. i - d -диаграмма может быть использована и для определения параметров влажного воздуха по показаниям сухого термометра t_c и мокрого термометра t_m .

Для этого на i - d -диаграмме нанесены пунктирные прямые линии, несколько отклоняющиеся по направлению от линий ($i = \text{const}$).

Каждая из этих линий отвечает определенной постоянной температуре мокрого термометра ($t_m = \text{const}$).

Значения, соответствующие каждой из этих линий, можно отсчитывать по точкам пересечения этих линий с линией ($\varphi = 100\%$). Легко заметить, что здесь пунктирные линии ($t_m = \text{const}$) пересекаются с линиями $t = \text{const}$ (соответствующими значениям t_c). Следовательно, в этих точках ($\varphi = 100\%$) значения t_c равны значениям t_d . Выше при описании психометра мы уже отмечали, что при полном насыщении воздуха, т. е. когда $\varphi = 100\%$, психометрическая разность ($t_c - t_m$) = 0 и $t_c = t_m$.

Зная t_c и t_m влажного воздуха, можно по точке пересечения соответствующих линий ($t_m = \text{const}$) и ($t = \text{const}$) определить все параметры этого воздуха.

Пример. Определить с помощью i - d -диаграммы параметры влажного воздуха, у которого $t_c = 60^\circ$, а $t_m = 35^\circ$.

На прилагаемой i - d -диаграмме пересечение линий $t = \text{const} = 60^\circ$ с линией $t_m = \text{const} = 35^\circ$ отмечено буквой L .

По точке L находим, что при $t_c = 60^\circ$ и $t_m = 35^\circ$, $i = 30,9$ кал/кг сухого воздуха $\varphi = 20\%$; $d = 26,4$ г/кг сухого воздуха; $p_d = 30$ мм рт. ст.

В тех случаях, когда искомая точка находится между линиями ($\varphi = \text{const}$), определение величины φ может быть проведено примерно, по положению данной точки по отношению к ближайшим линиям $\varphi = \text{const}$.

Однако значительно точнее φ может быть найдено по величине отношения $\frac{p_p}{p_{п.п}}$

Значение p_p для определенной точки на i - d -диаграмме легко может быть определено. Парциальное давление пара, насыщенного при температуре влажного воздуха t° , легко может быть найдено по графику, приводимому на рис. 16 и построенному на основании цифр табл. 8.

При температуре влажного воздуха, превышающей $99,4^\circ$ (температура кипения при барометрическом давлении, равном 745 мм рт. ст.), $p_{п.п}$ следует принимать равным барометрическому давлению.

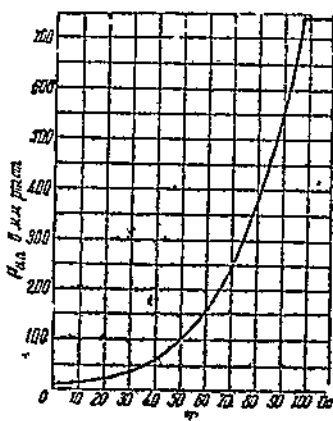


Рис. 16. График зависимости давления насыщенного пара ($P_{п.п.}$) от температуры (t)

Таблица 8

Температура в °С	Парциальное давление насыщенного пара ($p_{н.п.}$) в мм рт. ст.	Температура в °С	Парциальное давление насыщенного пара ($p_{н.п.}$) в мм рт. ст.
0	4,6	55	118,0
5	6,6	60	149,4
10	9,2	65	187,4
15	12,8	70	237,0
20	17,5	75	289,0
25	23,8	80	354,8
30	31,8	85	433,5
35	42,2	90	525,5
40	55,3	95	633,6
45	71,8	99,4	745,0
50	92,5	>99,4	745,0

Для точки L нашего примера в табл. 8 находим, что $p_{н.п.} = 149,4$ мм рт. ст. Так как, кроме того, p_n для этой точки равно 30 мм рт. ст., можно написать, что

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{н.п.}} \cdot 100 = \frac{30}{149,4} \cdot 100 \approx 20\%.$$

Пример 2. Найти параметры воздуха, имеющего $t_c = 120^\circ$ и $t_m = 50^\circ$.

На $i-d$ -диаграмме состоянию этого воздуха соответствует точка M .

По этой точке находим, что $i = 65,1$ Кал/кг сухого воздуха, $d = 57,8$ г/кг сухого воздуха; $p_n = 61,2$ мм рт. ст.; $p_{н.п.} = 745$ мм рт. столба;

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{н.п.}} = \frac{61,2}{745} = 0,065, \text{ или}$$

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{н.п.}} \cdot 100 = \frac{61,2}{745} \cdot 100 = 6,5\% \text{ сухого воздуха.}$$

Влажность материала

Основная задача процесса сушки — снижение влажности сушимого материала.

Под влажностью материала принято понимать весовое количество содержащейся в нём воды, выраженное в процентах к весу материала (относительная влажность материала) или в процентах к весу сухого вещества материала (абсолютная влажность материала).

Исходя из этого определения, мы можем написать, что:

$$W = \frac{B}{M} \cdot 100\%, \quad (42)$$

где: W — относительная влажность материала (в %),

B — вес воды в материале (в кг),

M — вес материала (в кг)

и

$$W^a = \frac{B}{CB_m} \cdot 100\%, \quad (43)$$

где: W^a — абсолютная влажность материала (в %),

B — вес воды в материале (в кг),

CB_m — вес сухого вещества материала (в кг).

В сушильной технике пользуются понятиями относительной влажности (W) и абсолютной влажности (W^a) материала. Соотношение между относительной и абсолютной влажностью материала определяется нижеприводимыми формулами (44), (45) и иллюстрируется графиком, приводимым на рис. 17.

$$W^a = \frac{100 \cdot W}{100 - W} \% \quad (44)$$

$$W = \frac{100 \cdot W^a}{100 + W^a} \% \quad (45)$$

Классификация влаги в материале с точки зрения связи влаги с материалом

С точки зрения связи влаги с материалом различают следующие виды воды:

1) окклюзионная вода, находящаяся в материале в больших его порах и пустотах (диаметром больше 1 мм); такая вода легко может быть удалена из материала механическим путём (давлением или давлением после предварительного измельчения материала);

2) капиллярная вода, находящаяся в очень маленьких (менее 1 мм) порах и пустотах между волокнами или другими структурными элементами материала; капиллярная влага значительно крепче связана с материалом, так как её удерживает в нём и сила поверхностного натяжения, поэтому механическим путём из материала можно удалить только часть влаги, тем меньшую, чем меньше размеры пор, пустот и полостей, заполненных водой;

3) коллоидно-связанная вода, связанная с материалом в результате его гидратации и процесса его набухания;

4) химически связанная вода, входящая в состав молекул материала.

В процессе сушки обычно имеют дело с удалением из сушеного материала капиллярной и коллоидно-связанной воды.

Окклюзионную воду выгодно предварительно удалять из подлежащего сушке материала механическим путём.

Химически связанная вода в процессе сушки обычно не затрагивается.

Основным видом влаги в хлебе будет вода коллоидно-связанная. Некоторое количество воды может быть в хлебе в виде капиллярной воды, находящейся в микропорах хлеба. Окклюзионная вода в хлебе отсутствует. Химически связанная вода в процессе сушки сухарей практически ощутимой роли не играет.

Влажность материала с точки зрения процесса сушки

Большое значение в сушильном деле имеют понятия: 1) равновесной (устойчивой) влажности материала и 2) гигроскопической влажности материала.

Равновесная влажность материала. Опыт и практика показывают, что если влажный материал хранить в условиях постоянной относительной влажности воздуха, то влажность материала может некоторое время изменяться в ту или иную сторону. По истечении определённого времени влажность продукта делается постоянной, устойчивой, сохраняющейся без изменения неограниченно долгое время, но при условии, что неизменной будет и относительная влажность воздуха, окружающего данный материал.

Влажность материала при таких условиях становится устойчивой вследствие того, что наступает подвижное равновесие между давлением водяных паров в воздухе и давлением водяных паров над поверхностью влажного материала. При этом состоянии равновесия

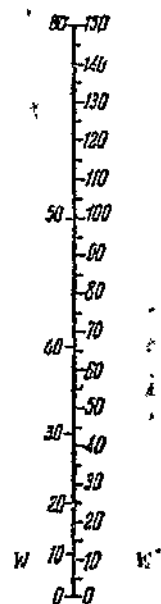


Рис. 17. График зависимости между абсолютной влажностью (W_a) и относительной влажностью (W) материала

число частичек воды, в виде пара, переходящих с поверхности материала в воздух, будет равно числу частичек воды, переходящих из воздуха на поверхность материала. Вследствие этого влажность материала и будет устойчивой и неизменной. Следовательно, условием достижения материала равновесной влажности будет равенство:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{п.м.}}$$

где: $P_{\text{п}}$ — парциальное давление паров воды в воздухе, окружающем материал,

$P_{\text{п.м.}}$ — давление паров воды непосредственно над поверхностью материала.

При одинаковой и неизменной температуре воздуха и материала $P_{\text{п}}$ тем больше, чем больше относительная влажность воздуха (вспомним,

что $\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{п.м.}}}$).

Давление паров воды непосредственно над поверхностью материала, при постоянной температуре материала, зависит от его влажности и его гигроскопических свойств.

Гигроскопические свойства материала зависят от способности материала связывать (коллоидно и капиллярно) воду. Чем больше эта способность материала, т. е. чем больше его гигроскопичность, тем меньше давление паров воды над поверхностью влажного продукта при данной его влажности.

Гигроскопичность для определённого материала постоянна, поэтому величина $P_{\text{п.м.}}$ для данного материала, при постоянной температуре, зависит от его влажности. Чем более влажен материал, тем больше величина $P_{\text{п.м.}}$.

Поэтому-то величина устойчивой, или точнее равновесной, влажности продукта (W_p) и зависит от относительной влажности воздуха.

Зависимость между относительной влажностью воздуха и равновесной влажностью материала, при неизменной температуре, может характеризоваться графически в виде кривой, носящей название *изотермы равновесной влажности материала*¹.

Для ржаных сухарей зависимость между φ и W_p может характеризоваться цифрами, приведёнными в табл. 9, и изотермой равновесной влажности (рис. 18).

Таблица 9

Относительная влажность φ воздуха (в %)	Равновесная влажность W_p^a сухарей (в %)
85	16,0
75	13,5
65	11,0
55	9,0
45	8,0
35	6,5

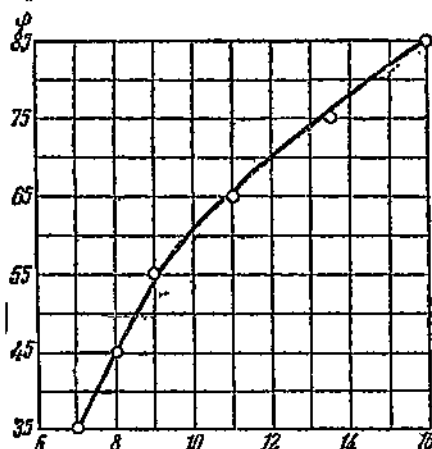


Рис. 18. Изотерма равновесной влажности ржаных сухарей

Равновесная влажность, как мы увидим далее, имеет большое значение как в процессе сушки сухарей, так и в процессе их хранения.

¹ В более точных исследовательских работах различают *изотермы сорбции*, получаемые в условиях, когда продукт имел влажность ниже равновесной влажности и приближался к ней за счёт увеличения его влажности, и *изотермы десорбции*, когда влажный продукт снижал свою влажность до уровня равновесной влажности. Между изотермами сорбции и десорбции существует небольшая разница, не имеющая практического производственного значения.

Гигроскопическая влажность материала. Гигроскопические свойства материала характеризуются величиной гигроскопической влажности W_r материала.

Гигроскопической называют влажность материала, ниже которой парциальное давление паров воды над поверхностью материала меньше давления пара, насыщенного при данной температуре.

Чем больше гигроскопичность материала, способность его коллоидно и капиллярно связывать воду, тем больше величина его гигроскопической влажности.

Понятия равновесной и гигроскопической влажности материала часто путают или даже отождествляют.

Зависимость между равновесной и гигроскопической влажностью материала может быть пояснена схематическим графиком (рис. 19), где

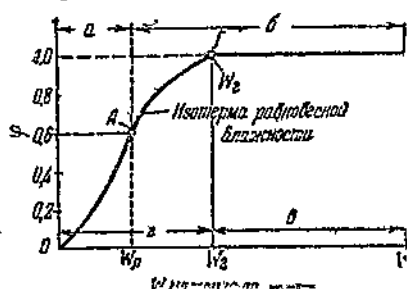


Рис. 19. Влажность материала с точки зрения процесса сушки

изотерма равновесной влажности материала нанесена линией OAГ. Кривая этой изотермы является местом расположения точек, характеризующих равновесную влажность материала в зависимости от относительной влажности воздуха.

Величина W_p материала, соответствующая $\varphi = 0,6$, характеризуется на этом графике точкой A.

Величина гигроскопической влажности (W_r) материала характеризуется точкой z. Легко заметить, что значение гигроскопической влаж-

ности совпадает со значением равновесной влажности продукта при полном насыщении воздуха влагой (при $\varphi = 1,0$).

При любой другой относительной влажности воздуха (при $\varphi < 1,0$) равновесная влажность материала ниже гигроскопической влажности.

Исходя из понятия равновесной влажности материала, различают: влажность материала свободную и устойчивую.

Свободная влажность материала $W_{своб}$ характеризуется следующей формулой:

$$W_{своб} = (W - W_p), \quad (46)$$

где: $W_{своб}$ — свободная влажность материала,

W — общая влажность материала,

W_p — равновесная влажность материала при данном значении φ воздуха.

Размер a на рис. 19 характеризует зону устойчивой влажности материала, а размер $б$ зону свободной влажности материала. Легко заметить, что при разных значениях φ и W_p размеры a и $б$ и граница зон свободной и устойчивой влажности будут соответственно изменяться.

Деление влаги материала на устойчивую и свободную, хотя условно и зависит от значения φ , но имеет большое практическое значение в сушильной технике, так как сушильный воздух при данной его относительной влажности может удалить из сушимого материала только свободную влагу.

Исходя из понятия гигроскопической влажности материала, различают зону его гигроскопического состояния и зону его влажного состояния.

Границей этих зон является точка гигроскопической влажности материала.

На нашем графике (рис. 19) зона гигроскопического состояния материала характеризуется размером z , а зона влажного состояния материала — размером $б$.

В зоне влажного состояния материала при влажности материала, превышающей его гигроскопическую влажность, парциальное давление паров над его поверхностью равно давлению пара, насыщенного при данной температуре.

В зоне гигроскопического состояния материала парциальное давление паров воды над поверхностью материала (вследствие гигроскопичности материала) ниже давления пара, насыщенного при данной температуре.

Наличие зон влажного и гигроскопического состояния материала имеет, как мы увидим далее, также известное значение в практике сушильного дела, будучи связанным с изменением скорости процесса испарения влаги при сушке.

В. ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ СУХАРЕЙ

Сушкой принято называть процесс снижения влажности сушимого материала, осуществляемый с помощью сушильного агента, Сушильный агент (в большинстве случаев нагретый воздух), соприкасаясь с сушимым продуктом, подводит к нему тепло, осуществляет процесс испарения из него влаги и уносит пары воды, испарённой из материала.

Таким образом сушильный агент является одновременно и теплоносителем, и влагоносителем.

При сушке сухарей сушильным агентом является предварительно нагретый воздух¹.

В процессе сушки сухарей из 1 т ломтей хлеба необходимо испарить до 400 кг воды.

Задачей сушильного процесса является получение из хлеба доброкачественных сухарей с затратой на это наименьшего количества тепла, электроэнергии и времени.

Для сознательного и успешного разрешения этой задачи необходимо уяснить себе, какие явления происходят в ломте хлеба в процессе его сушки и какие факторы можно использовать для регулирования этих явлений.

При удалении влаги из сушимого материала происходят следующие три процесса:

- 1) испарение влаги с поверхности материала в сушильный воздух;
- 2) перемещение влаги в материале от внутренних слоёв его к поверхностным;
- 3) теплообмен между сушильным воздухом и сушимым материалом и соответствующее изменение температуры сушимого материала и сушильного воздуха.

Ломти хлеба в момент начала их сушки имеют температуру, равномерную по всей толще, обычно равную температуре воздуха в помещении сухарного цеха. Влажность ломтя хлеба перед сушкой также практически равномерна во всей массе мякиша.

Поверхность ломтей хлеба при сушке омывается нагретым воздухом, движущимся между ломтями хлеба с определённой скоростью (обычно в пределах от 0,5 до 5,0 м/сек).

В сушильной технике широко используется гипотеза, предполагающая на поверхности сохнущего материала наличие тонкого слоя, как бы плёнки неподвижного воздуха.

¹ Проводились опыты по использованию для сушки сухарей в качестве сушильного агента топочных газов, предварительно очищенных от золы и других примесей и разбавленных воздухом до необходимой температуры. Однако опыты не привели ещё к промышленному использованию их результатов.

При испарении влаги с поверхности сушеного материала пары воды диффундируют через этот слой в подвижный воздух, омывающий продукт.

Поэтому процесс испарения влаги с поверхности сушеного продукта часто называется внешней диффузией влаги.

Толщина этой предполагаемой неподвижной плёнки воздуха вокруг поверхности сохнущего продукта уменьшается по мере увеличения скорости воздуха, омывающего сушёный продукт.

Перемещение влаги внутри сушеного продукта называют внутренней диффузией влаги.

Перемещение влаги внутри самого материала зависит от соотношения и направленности двух видов диффузии влаги — концентрационной диффузии и термодиффузии влаги.

Под концентрационной диффузией мы понимаем перемещение влаги в материале из мест с большей концентрацией влаги в места с меньшей концентрацией влаги. Таким образом, концентрационная диффузия стремится как бы выровнять концентрацию влаги во всех точках материала, и обуславливается разностью концентрации влаги (градиентом влажности) в материале.

Термодиффузия влаги вызывается разностью (градиентом) температур в разных точках материала и направлена от более нагретого участка материала к менее нагретому (по ходу теплового потока).

Как только ломти хлеба попадают в сушилку и приходят в соприкосновение с нагретым сушильным воздухом, начинается процесс испарения влаги с их поверхности, начинается процесс внешней диффузии влаги. Вследствие этого внешний слой ломтей хлеба становится суше, что создаёт разность концентрации влаги во внешнем и внутреннем слоях ломтя.

Разность концентрации влаги вызывает концентрационную диффузию влаги от более влажного, срединного, слоя к менее влажному, поверхностному слою. Влага с поверхности ломтя опять испаряется, опять создается разность концентрации влаги во внешнем и внутренних слоях ломтя, опять происходит перемещение влаги к поверхности ломтя вследствие концентрационной диффузии и т. д. до тех пор, пока вся масса сухаря не придёт в состояние равновесной влажности. Ниже равновесной влажности сухарь высушить нельзя.

Подвергаемые в сушилке воздействию подогретого воздуха ломти хлеба начинают изменять свою температуру, причём наружные слои ломтей, соприкасаясь непосредственно с горячим воздухом, будут иметь более высокую температуру по сравнению с внутренними. Под влиянием разности температур в материале влага будет стремиться перемещаться вследствие термодиффузии от более нагретых, внешних, слоев материала к менее нагретым, внутренним, слоям ломтя хлеба. Концентрационная диффузия, вследствие большой разницы во влажности и малой разницы в температуре внешних и внутренних слоев ломтя хлеба, в процессе сушки берёт перевес, и влага вследствие этого перемещается от срединных, более влажных, слоев к наружным, менее влажным, слоям.

Таким образом, термодиффузия в процессе сушки сухарей является отрицательным фактором, замедляющим перемещение влаги к поверхностным слоям ломтя.

В процессе сушки разных продуктов и материалов большое значение имеет соразмерность процессов внешней и внутренней диффузии. Ряд материалов (например волокнистые) имеет очень небольшое сопротивление внутренней диффузии и очень большую скорость внутренней диффузии влаги.

У этих материалов скорость процесса сушки практически определяется скоростью испарения влаги с поверхности, поскольку внутренняя

диффузия влаги к поверхности не отстает от скорости внешней диффузии. Некоторые другие материалы, наоборот, отличаются большим сопротивлением и малой скоростью внутренней диффузии влаги. У этих материалов в процессе сушки может наблюдаться большая разность концентрации влаги во внешних и внутренних слоях продукта, может создаваться большой градиент влажности.

Скорость сушки таких материалов в основном определяется не внешней диффузией, не испарением влаги с поверхности, а скоростью внутренней диффузии влаги в сушимом продукте.

Форсирование испарения с поверхности при сушке таких продуктов приводит к большому градиенту влажности вследствие отставания процесса внутренней диффузии от процесса внешней диффузии (испарения с поверхности). Понижение влажности вызывает усадку материала. Поэтому значительный градиент влажности имеет результатом значительную разность в усадке внешних и внутренних слоёв сушеного материала. У ряда материалов, например у дерева, это ведёт к возникновению в материале внутренних напряжений, что, в свою очередь, приводит к образованию трещин на поверхности материала. Чем больше градиент влажности в сушеном материале, тем больше опасность его растрескивания.

Исходя из этого, скорость испарения с поверхности при сушке материалов с большим сопротивлением внутренней диффузии следует сравнивать со скоростью внутренней диффузии.

К какой же группе материалов, с точки зрения сопротивления внутренней диффузии, следует отнести хлеб в процессе сушки из него сухарей?

Опыты, проводившиеся в Московском технологическом институте пищевой промышленности, показали, что хлеб обладает достаточно большим сопротивлением внутренней диффузии, большим, например, чем у глины и кожи, но меньшим, чем у дерева и мыла.

Поэтому скорость внутренней диффузии играет значительную роль в процессе сушки сухарей, обуславливая значительный градиент влажности в сушимых ломтях хлеба. По той же причине поверхность ломтя хлеба, помещённого в сушилку, очень быстро снижает свою влажность до равновесной влажности, соответствующей относительной влажности сушильного воздуха.

Наряду с этим значение скорости процесса испарения влаги с поверхности играет в процессе сушки сухарей немаловажную роль, что возможно объяснить пористым строением хлеба. Пористость хлеба, большая внутренняя поверхность этих пор, факт соединения ряда пор между собой и с поверхностью среза ломтя хлеба делают, очевидно, действительную поверхность испарения значительно большей, чем поверхность боковых плоскостей ломтя хлеба.

Пористая структура и упругие свойства хлебного мякиша, особенно в нагретом его состоянии, объясняют, очевидно, и тот факт, что большой градиент влажности в ломте хлеба совершенно не обязательно ведёт к растрескиванию сухаря.

Факторы, влияющие на скорость внешней и внутренней диффузии влаги в процессе сушки

Для того чтобы сознательно проектировать режим сушки сухарей или управлять этим режимом, необходимо знать, какие факторы могут быть использованы для регулирования процессов внешней и внутренней диффузии влаги в сушимом продукте.

Скорость внешней диффузии — скорость испарения влаги с поверхности сушеного продукта зависит от:

1) поверхности испарения продукта: чем больше поверхность испарения продукта, тем скорее идёт внешняя диффузия влаги; при сушке сухарей следует учитывать, как уже отмечалось, и фактор пористости хлеба, увеличивающий поверхность испарения по сравнению с поверхностью боковых плоскостей ломтя хлеба;

2) скорости движения сушильного воздуха: чем больше скорость воздуха, тем тоньше плёнка неподвижного воздуха на поверхности ломтей хлеба, тем больше скорость испарения с поверхности;

3) температуры и влажности сушильного воздуха: чем выше температура и чем ниже влажность воздуха, тем скорее идёт испарение влаги с поверхности. В сушильной технике показателем сушильных свойств воздуха в части его температуры и влажности принято считать так называемую психрометрическую разность

$$(t_c - t_m),$$

где: t_c — температура сухого термометра,

t_m — температура мокрого термометра;

чем больше значение $(t_c - t_m)$ сушильного воздуха, тем скорее идёт процесс испарения с поверхности;

4) температуры сухого продукта: чем выше температура продукта, тем больше парциальное давление паров воды над его поверхностью, тем скорее идёт процесс испарения с поверхности.

Исходя из вышесказанного, можно прийти к заключению, что для ускорения внешней диффузии, для ускорения испарения с поверхности практически могут быть использованы такие мероприятия, как увеличение скорости и температуры сушильного воздуха и понижение его влажности; большое значение может иметь увеличение пористости хлеба. Наряду с увеличением скорости сушильного воздуха благоприятно будут влиять на скорость испарения с поверхности и улучшение аэродинамических условий омывания сухих ломтей хлеба.

На скорость внутренней диффузии влаги в сухом продукте влияют:

1) наличие термодиффузии её направленность и величина. При сушке сухарей в обычных конвекционных сушилках можно предполагать наличие известного градиента температуры и соответствующего ему термоимпульса для перемещения влаги от более нагретых внешних слоёв к менее нагретым внутренним слоям. Экспериментальных данных о термодиффузии влаги в процессе сушки сухарей, которые позволяли бы уточнить её роль во внутренней диффузии, пока не имеется. Можно, однако, предполагать, что значительный градиент влажности в ломте хлеба-сухаря в основной части процесса его сушки делает основной, движущей влагу, силой концентрационную диффузию, направленную из более влажных, срединных, слоёв к более сухим, поверхностным, слоям;

2) градиент влажности (разность концентрации влаги в поверхностном слое ломтя и в глубже расположенных слоях). Чем больше градиент влажности, тем интенсивнее будет происходить концентрационная диффузия влаги в сухом ломте;

3) температура сухого продукта: чем выше температура продукта, тем скорее будет проходить в нем внутренняя диффузия влаги.

Таким образом, для увеличения скорости внутренней диффузии выгодно повышать градиент влажности, однако его повышение может идти до известных пределов, так как дальнейшее его увеличение ведёт к ухудшению качества продукта, к его растрескиванию. Поэтому осо-

бейно важное значение для усиления внутренней диффузии получает повышение температуры ломтей хлеба (производящееся обычно в сушилке во время сушильного процесса).

Для того, чтобы установить пути увеличения температуры сушеного продукта, целесообразно сперва выяснить, от каких факторов зависит температура сушеного продукта и какова закономерность изменения этой температуры в процессе сушки.

Наглядное представление этой закономерности дано на рис. 20.

На рис. 20 изображён график, на котором совмещены три взаимно-связанные кривые: кривая сушки, кривая скорости сушки и кривая температуры сушеного материала.

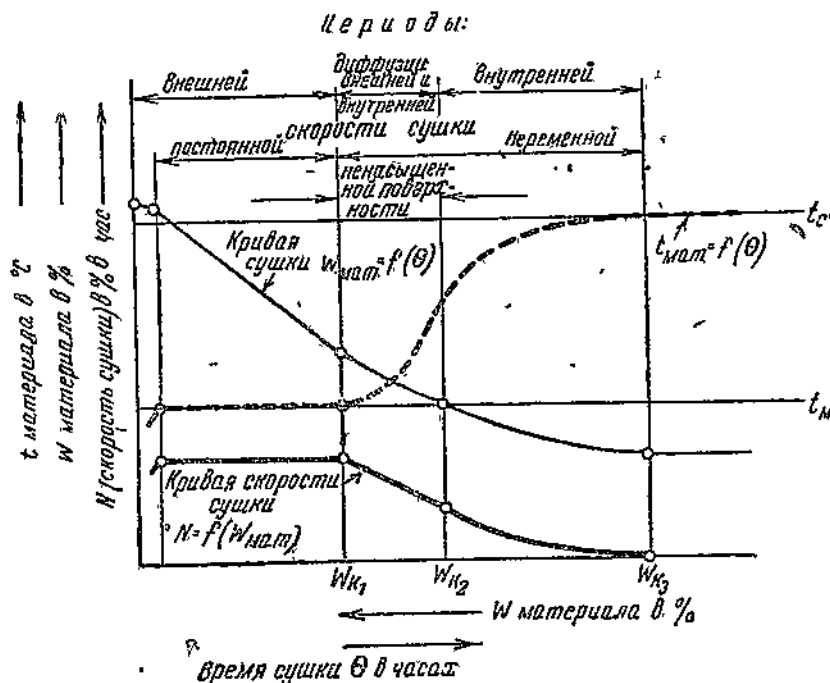


Рис. 20. Кривые сушки скорости сушки и температуры материала

Кривая сушки является основной и первичной характеристикой хода процесса сушки любого материала.

Кривая сушки представляет собою графическое изображение изменения средней влажности сушеного материала $W_{\text{мат}}$ за время θ :

$$W_{\text{мат}} = f(\theta).$$

Для построения этой кривой на оси абсцисс нанесены значения θ — времени сушки (в часах или минутах), а на оси ординат значения $W_{\text{мат}}$ — влажности материала в процентах.

Зная, как изменяется влажность материала через определённые промежутки времени его сушки, легко нанести на график точки и, соединив их линией, получить кривую сушки.

Для того, чтобы получить кривую сушки нескольких ломтей (или одного ломтя) хлеба в лабораторной экспериментальной сушилке, или кривую сушки для вагонетки с ломтями хлеба в производственной сушилке (в условиях определённого режима сушки), определяют среднюю влажность хлеба (для этого надо знать соотношение в хлебе корки и мякиша и влажность корки и мякиша) и затем через определённые про-

межутки времени сушки взвешивают сушимые ломти. Убыль в весе является показателем количества влаги, удалённой из хлеба при сушке.

Зная исходное количество в хлебе сухого вещества и влаги, легко по данным взвешивания хлеба простым расчётом определить влажность сушеного хлеба в определённые моменты сушки и по этим данным построить кривую сушки.

Если мы взглянем на кривую сушки, приведённую на рис. 20, то увидим, что влажность сушеного продукта снижается сперва быстро, потом постепенно замедляясь, и, наконец, с момента, когда влажность материала достигает влажности, обозначенной на рис. 20 как $W_{кз}$, влажность продукта практически перестаёт изменяться, т. е. остаётся постоянной при сушке любой длительности при данном режиме.

На основе всего известного нам о равновесной влажности, легко догадаться, что $W_{кз}$ это такая средняя влажность материала, при которой весь сушимый материал во всех его точках практически достиг равновесной (устойчивой) влажности.

Кривая скорости сушки может быть построена на основании кривой сушки, представляя собою результат соответствующей её обработки. Скорость сушки (обозначим её буквой N) можно условиться выражать в процентах влаги, испаренной из сушеного материала в час. Чем больше скорость, тем больший процент влаги будет испарен в час из сушеного материала.

Кривая скорости сушки выражает изменение скорости сушки в зависимости от влажности материала — $N = f(W_{мат})$.

Для изображения этой кривой численные возрастающие значения влажности материала $W_{мат}$ в % наносят по оси абсцисс по направлению стрелки (справа налево). На оси ординат нанесены значения N — скорости сушки в процентах в час.

Кривая скорости (рис. 20) показывает, что скорость сушки в течение очень короткого периода возрастает до какого-то наивысшего уровня и на этом уровне удерживается неизменной до момента, пока средняя влажность продукта не достигает первой критической точки $W_{к1}$, после чего скорость сушки начинает снижаться.

$W_{к1}$ — такая средняя влажность сушеного материала, при которой на его поверхности влажность равна гигроскопической влажности этого материала¹.

Период от момента начала сушки с постоянной скоростью по момент начала снижения скорости сушки (после достижения $W_{к1}$) носит в сушильной технике название периода постоянной скорости сушки.

В этот период влажность материала на его поверхности выше гигроскопической точки, и следовательно парциальное давление паров воды над поверхностью сушеного материала равно парциальному давлению паров над свободной поверхностью воды (при тех же температурных условиях).

Скорость же испарения со свободной поверхности воды при постоянных направлении, скорости и температуре воздуха — величина постоянная. Этим объясняется наличие у ряда сушимых материалов периода постоянной скорости сушки.

¹ У коллоидных грубопористых материалов, к которым надлежит отнести и хлеб, период падающей скорости сушки может начаться в то время, когда лишь незначительная часть поверхности — отдельные „островки“ достигнут гигроскопической точки влажности данного материала. В этом случае значению средней влажности материала $W_{к1}$ будет соответствовать средняя суммарная влажность всей поверхности материала, несколько превышающая его гигроскопическую точку влажности.

За этим периодом следует период падающей скорости сушки, завершающийся при $W_{к3}$ в момент, когда весь материал практически достигает равновесной влажности и процесс испарения прекратится (скорость сушки при этом = 0).

В период падающей скорости сушки есть еще одна вторая критическая точка средней влажности сушеного продукта $W_{к2}$, которая отвечает моменту достижения поверхностью сушеного продукта равновесной влажности.

Часть периода падающей скорости сушки, в пределах которого средняя влажность материала снижается с $W_{к1}$ до $W_{к2}$, принято называть зоной ненасыщенной поверхности материала, когда влажность поверхности сушеного материала снижается с влажности, отвечающей гигроскопической точке, до равновесной влажности. Этому периоду соответствует прямолинейное уменьшение скорости сушки (см. рис. 20).

Вторая часть периода падающей скорости сушки, охватывающая интервал снижения средней влажности сушеного материала от $W_{к2}$ до $W_{к3}$, характерна сильно замедляющейся, постепенно приближающейся к нулю скоростью сушки. Поскольку влажность поверхности материала в этот период не превышает равновесной влажности, скорость сушки в этом периоде зависит исключительно от скорости внутренней диффузии. Исходя из этого, Лыков [7] предлагает называть этот период периодом внутренней диффузии.

С этой точки зрения период постоянной скорости сушки может быть назван периодом внешней диффузии, так как в его пределах скорость сушки материала обуславливается исключительно скоростью внешней диффузии влаги.

В периоде ненасыщенной поверхности материала скорость сушки определяется и внешней, и внутренней диффузией материала, почему этот период может быть назван периодом внешней и внутренней диффузии.

Кривая температуры материала — $t_{мат} = f(\theta)$ изображена на рис. 21.

В периоде постоянной скорости сушки температура материала также может быть постоянной и равной t_m (температуре мокрого термометра). Выше уже отмечалось, что t_m является температурой, которая в зависимости от температуры, влажности и скорости воздуха устанавливается при испарении воды со свободной поверхности.

Поэтому-то в периоде постоянной скорости испарения, когда парциальное давление паров воды над поверхностью сушеного продукта соответствует парциальному давлению паров, испаряемых в этих же условиях со свободной поверхности воды, температура сушеного продукта остаётся постоянной и не может превысить значения t_m .

Сушимый продукт достигает температуры сушильного воздуха t_c лишь после того, как прекратится поглощающий тепло процесс испарения, а это произойдет в момент, когда будет достигнута $W_{к3}$, т. е. когда весь сушимый материал достигнет равновесной влажности. После этого температура материала, достигнув значения t_c , будет оставаться на этом уровне неизменной, как бы долго материал ни находился в сушилке.

В зависимости от того, имеет ли место при сушке того или иного материала период постоянной скорости испарения, и от того, сколько длителен этот период, целесообразно применять те или иные мероприятия для повышения температуры сушеного продукта в процессе его сушки. График II свидетельствует о том, что в период постоянной скорости испарения температура сушеного материала не зависит от t_c , а определяется исключительно величиной t_m . Из этого следует, что повышение

t_* без повышения t_* не будет вести к увеличению в этот период температуры сушеного материала. Поэтому, если мы хотим повысить температуру материала с большим периодом постоянной скорости испарения, то следует увеличивать t_* , что скорее всего достигается повышением влажности сушильного воздуха.

Исходя из этих соображений, отдельные конструкции сушилок, предназначенные специально для сушки сухарей, предусматривали устройство специальных форкамер, в которых сухарь прогревался бы в атмосфере сильно увлажнённого воздуха.

Однако рядом исследований было установлено, что при сушке сухарей¹ период постоянной скорости испарения отсутствует, очевидно, вследствие достаточно высокой способности хлеба связывать воду, и достаточно большого сопротивления вследствие этого внутренней диффузии влаги. В соответствии с тем, что весь процесс сушки сухарей протекает в периоде падающей скорости испарения, роль t_* (а следовательно, и роль влажности) сушильного воздуха в процессе прогрева продукта соответственно снижается. Следовательно, наиболее простым и эффективным способом повышения температуры сушеного хлеба-сухаря с целью ускорения внутренней диффузии влаги в нём, является повышение температуры сушильного воздуха.

Отметим кстати, что прогрев массы сушеного продукта может быть резко ускорен и проводим независимо от параметров воздуха, окружающего сушимый продукт, в случае воздействия на сушимый продукт лучистой теплотой.

VI. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О РАБОТЕ СУШИЛКИ

Изменение параметров воздуха при прохождении через сушильный агрегат

На рис. 21 мы приводим схему движения воздуха и сушеного продукта в наиболее распространённой из применяемых для сушки сухарей тоннельной сушилке.

Стрелки, нанесенные сплошными линиями, изображают направление сушильного воздуха, а стрелки, изображённые пунктиром, — возможные направления продукта.

Буквенные обозначения для параметров сушильного воздуха приняты на схеме следующие:

t — температура (в $^{\circ}\text{C}$),

i — теплосодержание (в Кал/кг сухого воздуха),

d — влагосодержание сушильного воздуха (в г/кг сухого воздуха),

φ — относительная влажность в $\%$.

Наружный воздух, проходя калорифер, увеличивает свою температуру ($t_2 > t_1$) и теплосодержание ($i_2 > i_1$), уменьшает относительную влажность ($\varphi_2 < \varphi_1$) и оставляет неизменным влагосодержание ($d_2 = d_1$).

Нагретый в калорифере воздух, проходя сушилку и осуществляя процесс высушивания хлеба, понижает свою температуру ($t_3 < t_2$) и повышает свое влагосодержание за счёт влаги сушеного продукта ($d_3 > d_2$). Относительная влажность сушильного воздуха при этом повышается как за счёт повышения влагосодержания воздуха, так и за счёт понижения температуры воздуха. Теплосодержание воздуха при этом остаётся неизменным ($i_3 = i_2$).

Таков характер изменений температуры, количества тепла и влагосодержания сушильного воздуха в теоретической тоннельной сушилке.

¹ При обычной толщине ломтей хлеба 15—25 мм.

В практических сушилках вследствие потерь части тепла сушильного воздуха через стенки сушилки и воздухопроводов в окружающую среду, теплосодержание воздуха, выходящего из сушилки, несколько меньше теплосодержания воздуха, выходящего из калорифера ($i_3 < i_2$).

Для многих расчётов, связанных с изменением в процессе сушки перечисленных выше параметров влажного сушильного воздуха, в сушильной технике широко используют $i-d$ -диаграмму.

В зависимости от направления потока воздуха и потока сушимого материала при сушке сухарей в тоннельных сушилках различают сушку противотоком и параллельным током.

Сушка противотоком предполагает, что воздух и сушимый продукт движутся во взаимнопротивоположных направлениях. При сушке параллельным током направления движения воздуха и перемещения сушимого материала совпадают.

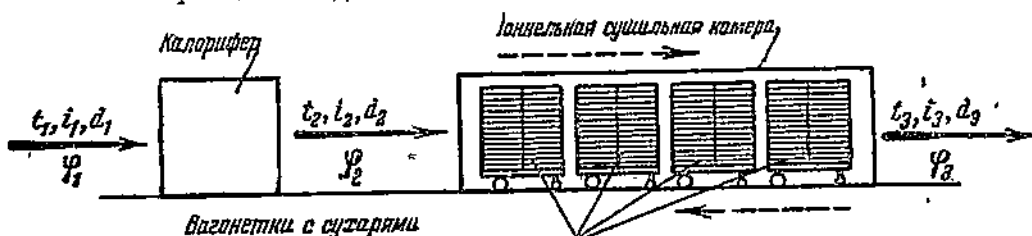


Рис. 21. Схема движения воздуха и сушеного продукта в тоннельной сушилке

В работе сушилок часто используется так называемая рециркуляция сушильного воздуха. Под рециркуляцией понимают возврат части сушильного воздуха для повторного прохождения сушильной камеры в смеси со свежезабираемым воздухом. Чем больше доля возвращаемого воздуха, тем полнее будет использование его теплосодержания и влажёмкости, тем с более низкой температурой и тем с большим насыщением выбрасывается из сушилки отработанный воздух.

Использование рециркулирующего воздуха создаёт также возможность применения больших скоростей движения воздуха в сушилке, при высоком использовании его теплосодержания и влажёмкости.

Материальный баланс сушилки

Всякому, имеющему дело с сушкой сухарей, приходится сталкиваться с подсчётами количества хлеба, необходимого для получения заданного количества сухарей или, наоборот, требуется подсчитать количество сухарей, которое должно получиться из определённого количества хлеба.

Эти подсчёты, проводимые для какого-либо типа сушилки, обычно относятся к часовой производительности сушилки и определяются на основании так называемого материального баланса сушилки, который составляют, исходя из того, что при сушке материала (хлеба) из него удаляется только влага, а количество сухого вещества в хлебе (сухаре) остаётся постоянным. В действительности, во время сушки хлеба на сухари имеются некоторые потери сухого вещества, величину которых следует учитывать. Необходимо также учитывать влажность целого хлеба (среднюю для партии хлеба) и среднюю влажность сухарей в момент выхода их из сушилки.

Для составления баланса введём следующие обозначения веса (в кг):

- $G_{хл}$ — вес хлеба, поступающего в сушилку в час,
- G_c — вес сухарей, выходящих из сушилки в час,
- $G_{с.в.хл}$ — вес абсолютно сухого вещества, содержащегося в хлебе, поступающем в сушилку в час,
- $G_{с.в.сух}$ — вес абсолютно сухого вещества, содержащегося в сухарях, выходящих из сушилки в час.

Очевидно, что при отсутствии потерь сухого вещества при сушке:

$$g_{с.в. хл} = g_{с.в. сух},$$

$W_{хл}$ — относительная влажность хлеба (в %),

$W_{хл}$ — абсолютная влажность хлеба (в %),

$W_{сух}$ — относительная влажность сухарей в момент выхода их из сушилки (в %)

$W_{сух}$ — абсолютная влажность сухарей,

W — вес влаги, испаренной в час.

Тогда, при отсутствии потери сухого вещества при сушке ($g_{с.в. хл} = g_{с.в. сух}$) будем иметь следующие формулы: а) вес влаги, содержащейся в хлебе:

$$\frac{g_{хл} \cdot W_{хл}}{100} \text{ кг, или } \frac{g_{с.в. хл}}{100} \cdot W_{хл}^a \text{ кг,}$$

б) вес влаги, содержащейся в сухарях:

$$\frac{g_{сух} \cdot W_{сух}}{100} \text{ кг или } \frac{g_{с.в. сух} \cdot W_{сух}^a}{100} \text{ кг,}$$

в) количество испаренной влаги в сушилке в час:

1) при подсчете по относительной влажности:

$$W = g_{хл} - g_{сух} \frac{g_{хл} \cdot W_{хл} - g_{сух} \cdot W_{сух}}{100} \quad (47)$$

Преобразовав это равенство, получим:

$$\frac{g_{хл}}{g_{сух}} = \frac{100 - W_{сух}}{100 - W_{хл}},$$

т. е.

$$g_{хл} = g_{сух} \left(\frac{100 - W_{сух}}{100 - W_{хл}} \right) \quad (48)$$

$$g_{сух} = g_{хл} \left(\frac{100 - W_{хл}}{100 - W_{сух}} \right) \quad (49)$$

2) При подсчете по абсолютной влажности:

$$W = g_{хл} - g_{сух} = g_{с.в. хл} (W_{хл}^a - W_{сух}^a) \text{ кг/час,} \quad (47a)$$

т. е.

$$g_{сух} = g_{хл} - [g_{с.в. хл} (W_{хл}^a - W_{сух}^a)] \text{ кг/час} \quad (48a)$$

и

$$g_{хл} = g_{сух} + [g_{с.в. хл} (W_{хл}^a - W_{сух}^a)] \text{ кг/час.} \quad (49a)$$

г) Все абсолютно сухого вещества в хлебе и в сухарях, пропущенного сушилкой в час, при отсутствии потерь в нём будет:

$$g_{с.в. хл} = \frac{g_{хл} (100 - W_{хл})}{100} = g_{с.в. сух} = \frac{g_{сух} (100 - W_{сух})}{100} \text{ кг/час.} \quad (50)$$

Часть сухого вещества в хлебе теряется в процессе сушки.

В этом случае:

$$g_{сух} = K \cdot g_{хл} \frac{100 - W_{хл}}{100 - W_{сух}} \text{ кг/час,} \quad (51)$$

где: K — коэффициент сохранения сухого вещества материала (меньше единицы).

По некоторым опытным данным, величина потери сухого вещества в хлебе при сушке его может доходить до 0,8% от веса сухого вещества хлеба, а соответствующее значение K будет равно 0,992.

Приведенные выше формулы позволяют при заданных значениях влажности и весе хлеба определить вес получаемых из него сухарей и количество испаренной влаги и, наоборот, определять вес хлеба по весу полученных сухарей.

Баланс влаги и расход воздуха на сушку

Как вес абсолютно сухого вещества во время сушки (если нет потерь его) остаётся постоянным, так и вес абсолютно сухого воздуха, участвующего в процессе сушки (если нет его утечки), также остаётся постоянным. Общее количество влаги, имеющейся в сушимом материале и сушильном воздухе, также во всё время сушки (и опять-таки при отсутствии потерь) остаётся постоянным: влага переходит от сушеного продукта к воздуху, меняя своё состояние из жидкого в парообразное, но в любой момент процесса сушки общее количество влаги по весу, остающейся в материале и находящейся в воздухе, остаётся неизменным.

Обозначим:

L — вес воздуха в кг, необходимый для сушки хлеба в один час;

d_1 — вес влаги в одном килограмме воздуха при входе его в сушилку;

d_2 — вес влаги в одном килограмме воздуха при выходе его из сушилки.

Тогда количество влаги, которое приносит с собою воздух в один час (при входе в сушилку), будет:

$$L \frac{d_1}{1000} \text{ кг}$$

(d выражено в граммах; чтобы выразить его в килограммах, делим его на 1000); количество уносимой воздухом влаги в час будет:

$$L \frac{d_2}{1000} \text{ кг.}$$

Количество влаги по весу в материале до сушки и после сушки:

$$\frac{g_1 \cdot W_1}{100} \text{ и } \frac{g_2 \cdot W_2}{100}.$$

Как указано выше, количество влаги в материале и в воздухе при сушке остаётся неизменным, следовательно:

$$\frac{g_1 \cdot W_1}{100} + L \frac{d_1}{1000} = \frac{g_2 \cdot W_2}{100} + L \frac{d_2}{1000}, \quad (52)$$

так как $\frac{g_1 \cdot W_1}{100} - \frac{g_2 \cdot W_2}{100} = W$ (количество по весу испаренной влаги в час)

то преобразовав уравнение (52), будем иметь:

$$L = \frac{1000 \cdot W}{d_2 - d_1} \text{ или } \frac{L}{W} = \frac{1000}{d_2 - d_1}. \quad (52a)$$

$\frac{L}{W}$ есть количество воздуха, необходимое для испарения одного килограмма влаги.

Из уравнения (52a) видно, что количество потребного для сушки воздуха будет тем меньше, чем больше его влагосодержание при выходе из сушилки и чем оно меньше при входе.

Тепловой баланс сушилки

В настоящем разделе отметим, куда расходуется тепло, сообщённое сушильному воздуху, и сколько его надо затратить (сообщить воздуху в калорифере) при сушке материала. Обычно определяется количество тепла, которое идёт на испарение из сушеного материала одного килограмма влаги, так как, определив это количество и зная количество

сырого продукта (хлеба) и готового материала (сухарей), т. е. зная, сколько из него удаляется влаги, легко определить потребное количество тепла на данную партию хлеба и сухарей.

Сушилка, в которой нет потерь тепла и нет затрат на подогрев сушимого материала, называется теоретической.

В теоретической сушилке при температуре сушимого материала а, стало-быть и влаги, в нём заключённой, равной 0° , тепло, принесённое с воздухом в сушилку, идёт только на превращение влаги материала в пар, и так как этот пар и тепло переходят из материала опять к воздуху и уходят вместе с ним, то теплосодержание воздуха при входе его в сушилку и выходе из него остаётся постоянным.

Так как воздух уходит из сушилки всегда с температурой выше 0° , то он уносит с собою некоторое количество тепла.

Таким образом, в теоретической сушилке воздуху должно быть сообщено в калорифере помимо тепла, необходимого для испарения влаги из материала, ещё дополнительное тепло, которое уносится им из сушилки.

Действительная сушилка отличается от теоретической тем, что в ней имеются дополнительные потери:

а) потери на подогрев высушенного материала, так как температура сушимого материала (хлеба) всегда ниже температуры высушенного продукта (сухаря);

б) потери на нагревание кассет и вагонеток, которые в момент поступления их в сушилку имеют температуру цеха ($15-20^{\circ}$), а при выходе из неё — температуру выше начальной;

в) потери в окружающую среду: через кладку и стены сушильной камеры путём лучеиспускания, через неплотности камеры, через воздухопроводы, а также при открывании и закрывании дверей; чем лучше кладка, чем плотнее прикрыты двери камеры, чем меньше их держат открытыми, т. е. чем быстрее происходит процесс загрузки хлеба и выгрузки сухарей, тем меньше потери в окружающую среду, тем экономичнее работает сушилка.

Варианты сушильного процесса

а) Вариант сушильного процесса, приведённый выше при рассмотрении схемы тоннельной сушилки, называется *нормальным*; при этом предварительно подогретый один раз в калорифере воздух поступает в сушильную камеру и, пройдя её, уходит полностью в атмосферу.

Помимо этого варианта существуют и другие:

б) вариант сушилки с подогревом воздуха в сушильной камере; в этом случае поверхности нагрева для воздуха располагаются непосредственно в сушильных камерах. Особенность этих сушилок заключается в том, что за счёт внутреннего подогрева можно достичь высокого насыщения водяными парами отходящего воздуха, независимо от начальной температуры, т. е. нет необходимости её значительно повышать;

в) вариант сушилки с промежуточным подогревом воздуха. В этих сушилках сушильная камера разбита на несколько рабочих зон (или отдельных камер) и воздух, пройдя одну зону, подогревается вновь и направляется в следующую зону. Этот вариант, так же как и предыдущий, имеет целью понизить начальную температуру входящего в сушилку воздуха;

г) вариант сушилки с частичным возвратом (рециркуляцией) отработанного воздуха. По выходе из сушилки отработанный воздух частично выпускается в атмосферу, а частично возвращается к калориферу. На место выпущенного в атмосферу воздуха к калориферу направляет-

ся свежий в равном количестве, нагревается и поступает в сушильную камеру. По выходе из камеры поток воздуха вновь разветвляется, и т. д.

Вариант такой работы сушилки называется работой с рециркуляцией. Этот вариант наиболее распространён в сушилках вообще и в сахарных в частности, хотя и имеет свои отрицательные стороны. Возврат отработавшего воздуха, уже частично насыщенного влагой, значительно увеличивает количество циркулирующего в системе воздуха, вследствие этого увеличивается расход энергии на передвижение этой массы воздуха (мощные вентиляторы).

Широкое распространение сушилок с рециркуляцией воздуха объясняется следующими их преимуществами:

- 1) минимальный перепад между начальной и конечной температурой воздуха;
- 2) большие скорости воздуха внутри сушильной камеры;
- 3) гибкая регулировка влажности воздуха в сушильной камере.

ВН. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ХОД СУШКИ СУХАРЕЙ

К факторам, влияющим на ход сушки, относятся температура, скорость и влажность сушильного воздуха и движение материала в сушилке (противоток и параллельный ток).

Влияние температуры сушильного воздуха может быть иллюстрировано данными из нашей работы [9], приводимыми в виде графика на рис. 22. Сушка производилась неувлажнявшимся воздухом при $v = 4$ м/сек.

Как видно из графика, температура сушильного воздуха является фактором, очень сильно влияющим на скорость сушки сухарей.

Чем выше температура сушильного воздуха, тем скорее идёт процесс сушки сухарей. Исходя из этого, следовало бы применить наивозможно более высокую температуру сушильного воздуха. Однако для всего периода сушки температура сушильного воздуха не должна превышать $130-140^\circ$. Более высокая температура ведёт к неравномерному просушиванию сухарей, к чрезмерной просушке их в отдельных частях ломтя, обычно наиболее пористых или лучше омываемых воздухом. Чрезмерно быстро сохнувшие части ломтей перегреваются до t_c и приобретают буроватую окраску и горьковатый вкус. Это, однако, ни в какой мере не исключает применения для части процесса сушки и более высокой температуры сушильного воздуха ($140-160^\circ$).

При низкой температуре сушильного воздуха часто имеет место растрескивание сухарей в процессе сушки.

Влияние скорости сушильного воздуха, с которой он омывает сохнущие ломти хлеба, характеризуется графиками, приводимыми на рис. 23.

Сушка сухарей, характеризуемая графиками, приведёнными на рис. 23, производилась неувлажняемым воздухом.

Ниже в табл. 10 мы приводим вытекающие из этой серии опытов итоговые цифры, характеризующие время сушки сухарей до $W^a = 10\%$ при разной температуре t_c и скорости v неувлажняемого сушильного воздуха.

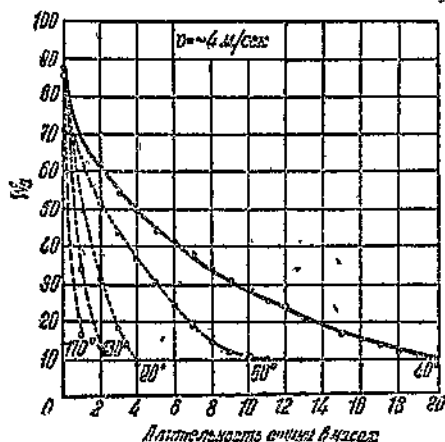


Рис. 22. Влияние температуры сушильного воздуха (t_c) на ход сушки сухарей

На основании данных табл. 10 легко установить, что повышение скорости сушильного воздуха с 0,7 до 5,0 м/сек имело результатом сокращение времени сушки до $W^2 = 10\%$ при $t_c = 120^\circ$ на 53,9%, при $t_c = 80^\circ$ на 42%, при $t_c = 60^\circ$ на 32,6%. При $t_c = 40^\circ$ увеличение скорости воздуха до 5 м/сек хотя и имело результа-

Таблица 10

t_c ($^\circ$)	Время сушки (в часах) до $W^2 = 10\%$ при скорости v		
	5,0 м/сек	2,5 м/сек	0,7 м/сек
120	2,4	3,7	5,2
80	4,7	6,6	8,1
60	8,7	12,1	12,9
40	—	20,3	20,3

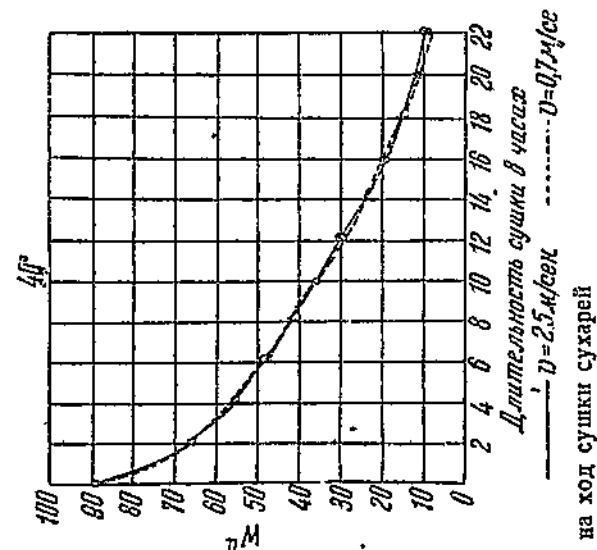
том небольшое (около 17%) уменьшение времени сушки сопровождавшееся, однако, расслаиванием почти всех сухарей, почему мы в вышеприведенных таблицах результатов этого опыта и не приводили.

Время сушки при 40° при $v = 0,7$ и 2,5 м/сек практически почти одинаково.

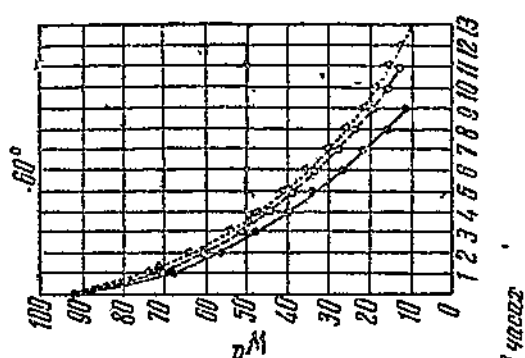
Из этого следует, что ускоряющее сушку влияние увеличения скорости сушильного воздуха сказывается тем больше, чем выше температура сушильного воздуха, и, наоборот, тем меньше, чем его ниже температура.

При высокой температуре сушильного воздуха целесообразно применение большей его скорости (~ 5 м/сек при $t_c \geq 120^\circ$).

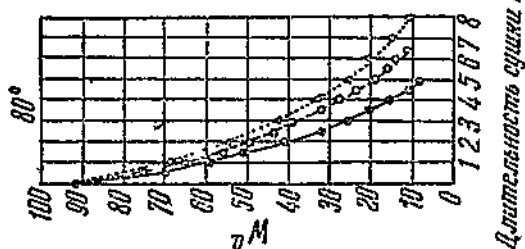
Влияние относительной влажности сушильного



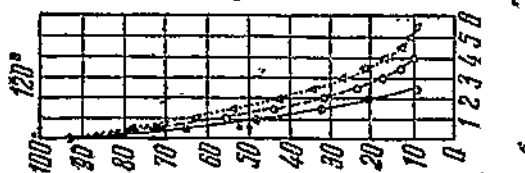
Длительность сушки в часах
— $v = 2,5$ м/сек
----- $v = 0,7$ м/сек



Длительность сушки в часах
— $v = 2,5$ м/сек
----- $v = 0,7$ м/сек



Длительность сушки в часах
— $v = 5$ м/сек
----- $v = 2,5$ м/сек
----- $v = 0,7$ м/сек



Длительность сушки в часах
— $v = 5$ м/сек
----- $v = 2,5$ м/сек
----- $v = 0,7$ м/сек

воздуха может иллюстрироваться графиком, приводимым на рис. 24. Эти данные получены в результате сушки ржаных сухарей $t_c = 90^\circ$ и $v \sim 2$ м/сек.

Как и следовало ожидать, повышение влажности сушильного воздуха замедляет процесс сушки сухарей вследствие соответствующего повышения парциального давления паров влаги в сушильном воздухе и снижения «психрометрической разности» ($t_c - t_m$).

Влияние сушки противотоком и параллельным током также было объектом нашего изучения.

При сушке сухарей в тоннельной сушилке режимом противотока вагонетки с ломтями хлеба попадают в сушилку, встречая воздух, уже прошедший почти всю сушилку и, следовательно, с пониженной температурой и повышенным влагосодержанием.

Перемещаясь периодически далее по тоннелю сушилки, вагонетки с сохнувшим продуктом встречают все более нагретый и менее увлажнённый сушильный воздух. Перед выходом из тоннеля сушилки сухари попадают в зону, в которой они омываются сушильным воздухом, непосредственно поступающим в W^a сушилку и поэтому имеющим наиболее высокую температуру и наиболее низкую влажность.

При сушке параллельным током воздух поступает в сушильный тоннель с того же конца, что и сушильный продукт. Поэтому вагонетка с ломтями хлеба сразу же соприкасается с сушильным воздухом наиболее высокой температуры и наиболее низкой влажности. По мере дальнейшего продвижения сухарей по сушилке они омываются воздухом все более низкой температуры и более высокой влажности.

При проектировании тоннельной сушилки должен быть избран один из двух упомянутых способов сушки.

Для выявления того, какой из этих способов сушки и в каких условиях целесообразно применять для сушки сухарей, были поставлены опыты при разных режимах, воспроизводящих режимы сушки противотоком и параллельным током при $t_c = 65^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 95^\circ$ (противоток) и $t_c = 95^\circ, 85^\circ, 75^\circ, 65^\circ$ (параллельный ток) и разных соответственных режимах относительной влажности сушильного воздуха, указанных на графиках рис. 25.

Результаты этой серии опытов иллюстрируются графиками, приводимыми на рис. 25. На этих графиках сплошными линиями нанесены кривые, относящиеся к сушке противотоком, и пунктирными линиями — кривые, относящиеся к сушке параллельным током.

При рассмотрении графика 25, а надо иметь в виду, что к концу сушки (после 11 часов сушки) φ сушильного воздуха увеличилось с 73 до 82%, чем и объясняется увеличение W^a сухаря с 16,4 до 17,0.

Из данных графиков, изображённых на рис. 25 а, б и в, можно сделать следующие выводы:

1) при низкой относительной влажности сушильного воздуха ($\varphi_{\max} < 30\%$) практически одинаково эффективна сушка как противотоком, так и параллельным током;

2) при более высокой влажности сушильного воздуха целесообразна сушка противотоком, так как высокая влажность воздуха к концу сушки при параллельном токе сильно замедляет завершение процесса сушки, а при $\varphi_{\max} > 50-60\%$ вообще делает невозможным получение сухаря с требуемой влажностью порядка 10%.

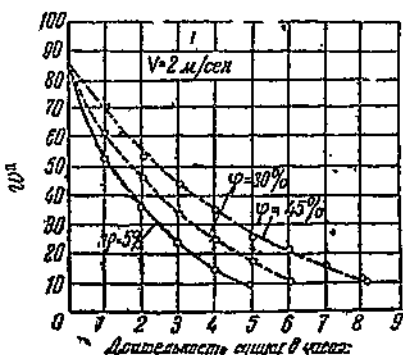


Рис. 24. Влияние относительной влажности сушильного воздуха (φ) на ход сушки сухарей

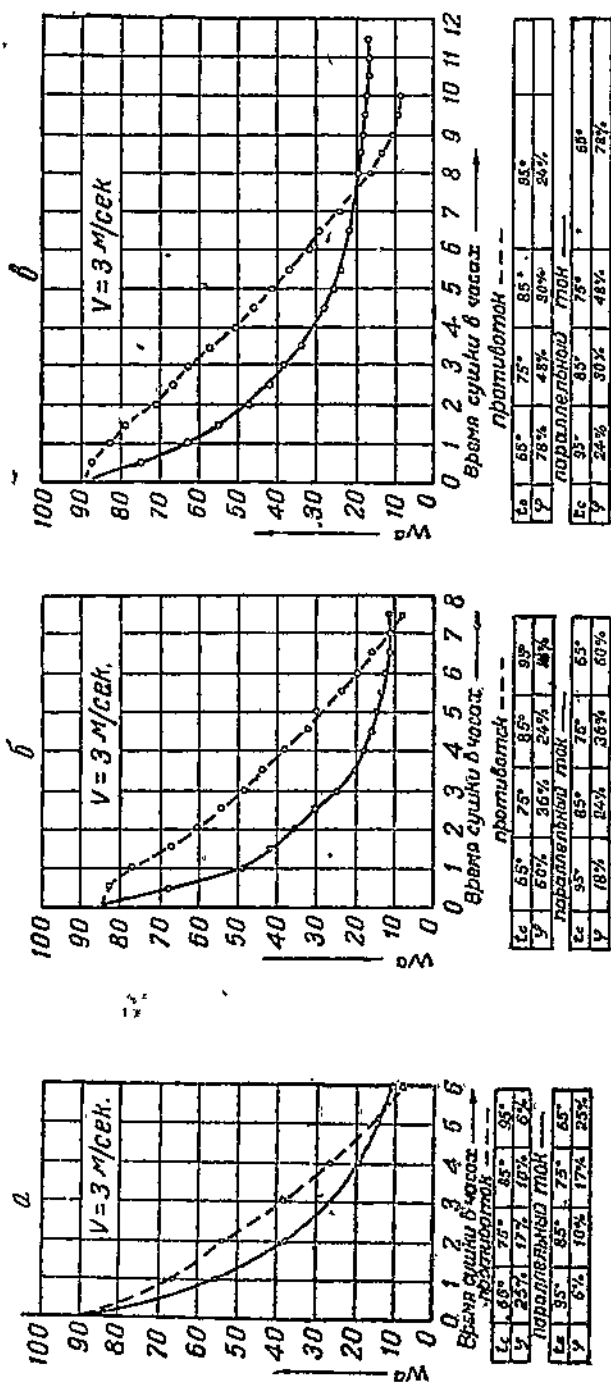


Рис. 25. Влияние сушки параллельным током и противотоком на ход сушки сухарей при разной относительной влажности сушильного воздуха

Так например, при сушке противотоком и φ конечн. 78% (рис. 25, в) минимальная достижимая абсолютная влажность сухаря была равна 16,4%.

Влияние процента пшеничной обойной муки в валке со ржаной обойной мукой также было изучено в нашей работе 1940 г. При этом было установлено, что увеличение процента пшеничной обойной муки в валке со ржаной обойной мукой понижает влажность хлеба, несколько повышает пористость хлеба и соответственно ускоряет сушку сухарей.

Усадка хлеба при сушке сухарей. Выше уже отмечалось, что при сушке сухарей из 1 т хлеба испаряется до 400 кг воды. Испарение столь значительного количества воды, занимающей в хлебе соответствующий объём, не может не сказаться на уменьшении объёма и линейных размеров ломтя хлеба в процессе его сушки.

На рис. 26 приводим схему ломтя хлеба с обозначением линейных его размеров. На основании измерений многих сотен ломтей хлеба и сухарей, полученных из этих ломтей при разных режимах сушки, проведённых в нашей сушильной лаборатории (1940 г.), было установлено, что линейные размеры:

a	сухаря	$\approx 0,92$	a	хлеба
b	"	$\approx 0,93$	b	"
c	"	$\approx 0,94$	c	"
d'	"	$\approx 0,95$	d'	"
d''	"	$\approx 0,65$	d''	"

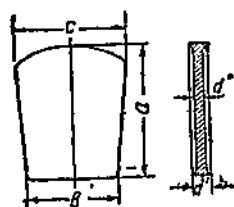


Рис. 26. Схема ломтя хлеба с обозначением его линейных размеров

Таким образом, можно констатировать, что все габаритные размеры сухаря меняются в процессе сушки сравнительно незначительно (усадка 5—8%). Резкое изменение претерпевает только толщина ломтя хлеба в центральной его части, характеризующая размером d'' . В этом направлении усадка равна, примерно, 35%.

Повидимому, твёрдая корка хлеба препятствует значительной усадке ломтя в остальных направлениях.

VIII. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Всякая сушильная установка состоит из двух основных рабочих частей:

1) первую часть (тепловую) составляют устройства, дающие необходимое сушильной установке тепло, 2) второй частью (сушильной) является сушильная камера, где происходит сушка продукта.

Обе рабочие части сушильной установки в свою очередь состоят из отдельных элементов.

Тепло, поступающее в сушильную камеру, приносится туда сушильным агентом — воздухом или дымовыми газами. В зависимости от рода сушильного агента устраивается тепловая часть сушильной установки, где производится нагрев этого агента.

В сушильных установках, где сушка производится непосредственно дымовыми газами, тепловая часть установки состоит обычно из топки, где происходит сжигание топлива и получение дымовых газов высокой температуры. За тонкой устанавливаются специальные устройства (золоуловители) для отделения из дымовых газов золы. Дымовые газы из топки поступают в камеру смещения, куда подаётся и свежий холодный воздух для понижения температуры. Количество поступающих в камеру смещения горячих дымовых газов и свежего воздуха регулируется в зависимости от требующейся для сушки температуры сушильного агента.

Из камеры смешения смесь дымовых газов с воздухом, соответствующей температуры, поступает в сушильную камеру.

В некоторых случаях самостоятельные топки для получения горячих дымовых газов отсутствуют и газы поступают в камеру смешения или от имеющейся котельной, или от какой-либо другой тепловой установки.

В сушильных установках, где сушка производится воздухом, для подогрева его пользуются специальными аппаратами-калориферами.

Подача дымовых газов и воздуха к сушильной камере, а равно и движение их в сушильной камере может производиться естественным путём или искусственным, с помощью специальных вентиляторов.

В первую очередь рассмотрим вопросы, связанные с движением воздуха в сушильной установке, и вентиляционную систему, осуществляющую это движение.

Вентиляционная система сушильной установки

Понятие о напоре и воздушных сопротивлениях

Как уже отмечалось, необходимым условием сушильного процесса является омывание сушимого продукта сушильным агентом (воздухом), т. е. его движение в сушильной камере.

При отсутствии обмена воздуха, после полного насыщения его водяными парами, процесс сушки прекратится. Чем интенсивнее отводится воздух от сушимого продукта, т. е. чем больше его скорость, тем быстрее идёт процесс сушки.

Для обеспечения подачи нужного количества воздуха в сушильную камеру, создания в ней необходимой скорости отвода отработанного воздуха частью наружу, частью для повторного нагревания (при рециркуляции) каждая сушильная установка имеет специальную вентиляционную систему, устройство которой зависит от конструкции и типа сушильной установки.

Движение воздуха и вообще газов из одного пространства в другое может происходить при одном обязательном условии, что давление воздуха в том пространстве, откуда он поступает, будет больше, чем давление в пространстве, куда воздух направляется. Эта разность давлений называется **напором** и измеряется в килограммах на квадратный метр или в мм в. ст.

Величина напора, которую необходимо иметь, чтобы переместить газ (воздух) из одного пространства в другое, зависит:

1) от скорости его перемещения (движения): чем больше скорость перемещения, тем больше должен быть напор;

2) от удельного веса газа (воздуха): чем газ тяжелее, тем напор должен быть больше, и

3) от пути, по которому передвигается газ (воздух): чем короче и прямее (меньше поворотов, изменений сечений и пр.) путь газов, тем меньше потери напора на преодоление сопротивлений, и напор, затрачиваемый на передвижение газа, может быть меньше.

Если потери в пути (на сопротивление) совершенно отсутствуют, то весь напор идёт на создание скорости движения воздуха. В действительности, воздух при перемещении всегда встречает сопротивление, почему часть напора тратится на его преодоление.

Таким образом, полный напор при передвижении воздуха расходуются: 1) на создание скорости передвижения воздуха; эта часть напора называется **скоростным** или **динамическим** напором, и 2) на преодоление сопротивлений по пути движения; эта часть напора носит название **статического напора**.

Если обозначить через:

H_0 — общий располагаемый напор,

H_d — динамический напор,

$H_{ст}$ — статический напор,

то:

$$H_0 = H_d + H_{ст}.$$

(53)

При установившемся движении воздуха или газа¹ общий напор автоматически распределяется на статический и динамический: часть напора тратится на преодоление сопротивлений, оставшаяся часть напора расходуется на создание скорости.

Общий и статический напоры в любом сечении канала, по которому движется воздух (газ), легко определяются при помощи простых приборов — манометрических трубок.

Если в какое-либо сечение $A-A$ (для которого определяется напор) канала MN (рис. 27) установить, как указано на рисунке, две коленообразные трубки 1 и 2, то при движении газа разница уровней жидкости в правом и левом колене трубки 1, расположенной в нижней части канала, будет показывать разность давлений воздуха в канале и в окружающей среде, т. е. статический напор $H_{ст}$, а разница уровней жидкости в коленях трубки 2, установленной своим верхним концом в центральной части канала против потока струи воздуха, покажет полный напор $H_0 = H_d + H_{ст}$; тогда скоростной напор H_d определится как разность показаний трубок 1 и 2.

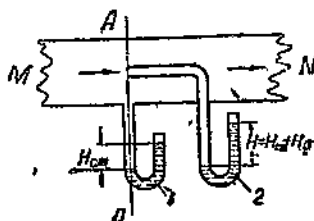


Рис. 27. Схема определения в воздуховоде статического и динамического напора

Определение напоров при помощи произведённых замеров возможно лишь при работающей системе. При проектировании же сушильных установок необходимый напор определяют путём расчёта.

Как указывалось, необходимый общий напор складывается из скоростного (динамического) и статического.

$$H_0 = H_d + H_{ст}.$$

Напор H_0 в любом сечении канала, по которому движется воздух, остаётся неизменным. Динамический напор определяется из уравнения:

$$H_d = \frac{v^2 \gamma}{2g} \text{ кг/м}^3 \text{ или мм в. ст.}, \quad (54)$$

где: v — скорость воздуха в м/сек,

γ — удельный вес воздуха в кг/м³ (1,2 при $t = 20^\circ$ и давл. = 760 мм),

g — ускорение свободно падающего тела, равное 9,81 м/сек².

Сопротивления на пути движения воздуха, на покрытие которых тратится статический напор, складываются из:

1) сопротивлений трения воздуха о стенки канала, по которому он движется, и от внутреннего трения частиц воздуха при движении;

2) сопротивлений так называемых местных, которые происходят от завихрения струй воздуха при изменении пути его движения — переход с прямолинейного на криволинейный (колена, отводы), изменение площади или формы сечения канала (сужение, расширение, переходы, задвижки и пр.), слияние или разделение потока (тройники, разветвление и пр.).

¹ Установившимся называется движение, при котором скорость в любом сечении канала (тоннель сушилки) остаётся постоянной.

Напор, затрачиваемый на преодоление сопротивлений трения, обозначается через H_R , на преодоление местных сопротивлений — через H_ξ .

Напор H_R определяется по формуле:

$$H_R = \rho \frac{u}{F} \cdot \frac{v^3 \gamma}{2g} l \text{ мм в. ст.}, \quad (55)$$

где: ρ — опытный коэффициент, зависящий от характера поверхности стенок канала; значение этого коэффициента может быть принято равным для железных каналов 0,0035 и для кирпичных 0,007,

u — периметр поперечного сечения канала в m ,

F — площадь поперечного сечения канала в m^2 ,

v — средняя скорость движения воздуха в канале в $m/сек$,

γ — удельный вес воздуха в $кг/м^3$,

l — длина канала в m .

Для упрощения подсчётов по приведённой формуле применяются готовые таблицы, дающие при определённой температуре и давлении воздуха сопротивление трению на 1 *лог. м* канала,

Напор, затрачиваемый на преодоление местных сопротивлений, может быть определен из формулы:

$$H_\xi = \Sigma \xi \frac{v^3 \gamma}{2g} \text{ мм в. ст.}, \quad (56)$$

где: Σ — знак суммы,

ξ — опытный коэффициент местного сопротивления, определённый для каждого вида изменения канала (колесо, тройник, разветвление, сужение сечения и т. п.).

Местные сопротивления подсчитываются для каждого участка пути, где происходят изменения сечения канала и его направления, и затем суммируются.

Значения ξ приводятся в специальных таблицах.

Подсчёт статического напора, требуемого для перемещения воздуха по каналу, сводится, таким образом, к суммарному определению потерь

напора на трение и местные потери на всём пути следования воздуха.

Подсчёт ведётся последовательно по всему пути от источника напора до самого отдалённого от него участка.

Рис. 28. Схема воздухопровода с ответвлением и поворотом

напор на трение и местные потери на всём пути следования воздуха.

Пример. Имеем железный квадратный канал $a-b-a$ сечением $1 \times 1 m$ с ответвлением $b-a$ и с поворотом на 90° (рис. 28). Воздух поступает в канал со стороны a и на участке $a-b$ имеет скорость $15 m/сек$, на участке от b до a скорость воздуха $10 m/сек$, при выходе из канала скорость воздуха $4 m/сек$.

Длина участка канала $a-b$ $20 m$, участка $b-a$ $10 m$.

Температура воздуха 100° ; $\gamma = 0,8 кг/м^3$.

Требуется определить напор, необходимый для того, чтобы воздух прошёл по каналу и вышел из него с заданными скоростями.

Полный напор:

$$H_o = H_d + H_{ст}$$

$$H_d = \frac{v^3 \gamma}{2g} = \frac{4^3 \cdot 0,8}{2 \cdot 9,81} = 0,7 \text{ мм в. ст.},$$

где: v — скорость воздуха по выходе из канала $4 m/сек$.

Статический напор:

$$H_{ст} = H_R + H_\xi$$

Напор на преодоление сопротивления трения:

$$H_R = \rho \frac{u}{F} \cdot \frac{v^3 \gamma}{2g} \cdot l,$$

где: $\rho = 0,0035$ (для железных труб),

$\alpha = 4$ м (периметр канала),

$F = 1$ м² (сечение канала),

$\gamma = 0,8$ кг/м³ уд. вес воздуха (при $t = 100^\circ$),

$g = 9,81$ м/сек²,

$v_1 = 15$ м/сек скорость воздуха для участка $\alpha - \beta$, длиной 20 м,

$v_2 = 10$ м/сек скорость воздуха для участка $\beta - \alpha$, длиной 10 м.

Подставляя значения, имеем:

$$\text{для участка } \alpha - \beta: H_R = 0,0035 \frac{4}{1} \cdot \frac{15^2 \cdot 0,8}{2 \cdot 9,81} \cdot 20 = 2,7 \text{ мм в. ст.}$$

$$\text{для участка } \beta - \alpha: H_R = 0,0035 \frac{4}{1} \cdot \frac{10^2 \cdot 0,8}{2 \cdot 9,81} \cdot 10 = 0,6 \text{ мм в. ст.}$$

$$\text{для всего участка } \alpha - \beta: H_R = 2,7 + 0,6 = 3,3 \text{ мм в. ст.}$$

Напор на преодоление местных сопротивлений равен:

$$H_{\xi} = \sum \xi \frac{v^2 \gamma}{2g},$$

где: $\Sigma \xi$ — коэффициенты местных сопротивлений (берутся из таблиц);

ξ_1 — при входе в канал = 0,3,

ξ_2 — при ответвлении = 0,5,

ξ_3 — при повороте на 90° = 0,25,

ξ_4 — при выходе из канала = 1,0.

$$H_{\xi} = (0,3 \cdot 15^2 + 0,5 \cdot 15^2 + 0,25 \cdot 10^2 + 1,0 \cdot 10^2) \cdot \frac{0,8}{2 \cdot 9,81} = 6,5 \text{ мм в. ст.}$$

Общий потребный напор:

$$H_o = H_{\kappa} + H_{\text{ст}} = H_{\kappa} + H_R + H_{\xi} = 0,7 + 3,3 + 6,4 = 10,5 \text{ мм в. ст.}$$

При подсчёте напора, необходимого в сушильных установках, воздушный тракт образуют: калорифер, воздухопровод от калорифера к сушильной камере, сама сушильная камера и воздухопроводы от сушильной камеры к калориферу (при рециркуляции).

Способы создания воздушного напора в сушильных установках

Создание движения воздуха в сушильных установках осуществляет естественным или искусственным путём. Естественная циркуляция воздуха создаётся за счёт разности удельного веса воздуха при изменении его температуры. Для искусственной циркуляции воздуха устанавливаются механические побудители — вентиляторы различного типа и эжекционные приборы.

Гидростатический напор. Напор в сушилках с естественной циркуляцией, носящий название гидростатического или гравитационного напора, образуется за счёт уменьшения удельного веса воздуха при его нагревании.

Некоторый нагретый объём воздуха с определённой площадью и высотой или, как говорят, некоторый столб нагретого воздуха, находясь в пространстве с более низкой температурой, имеет удельный вес меньше, нежели окружающий его холодный воздух. За счёт разницы удельных весов у основания столба нагретого воздуха возникает направленная вверх сила, которая стремится поднять столб нагретого воздуха вверх.

Обозначим вес в килограммах столба подогретого воздуха через $g_{\text{тепл}}$, а вес такого же столба холодного воздуха через $g_{\text{хол}}$. Тогда подъёмная сила P , направленная вверх, определится как разность весов столбов холодного и тёплого воздуха, т. е.

$$P = (g_{\text{хол}} - g_{\text{тепл}}) \text{ кг,} \quad (57)$$

где P является силой гидростатического напора, который обуславливает перемещение вверх тёплого, более лёгкого воздуха. Так как эта сила

направлена вверх и, стало быть, облегчает давление на нижележащие слои воздуха, то в данном случае гидростатический напор создаёт разрежение.

Если столб воздуха с определённой температурой находится в окружении воздуха с более высокой температурой, то в этом случае более холодный столб воздуха, как имеющий больший вес, будет опускаться вниз.

Сила гидростатического напора P , в этом случае направленная вниз, будет создавать давление.

Если в формуле (57) вес столба воздуха заменить его объёмом в m^3 , умноженным на удельный вес, а объём выразить соответственно как произведение основания на высоту, то силу P можно выразить так:

$$P = s \cdot F \cdot \gamma_1 - s \cdot F \cdot \gamma_2 = s \cdot F (\gamma_1 - \gamma_2) \kappa_2, \quad (57a)$$

где: s — высота столба воздуха в m ,

F — площадь основания столба воздуха в m^2 ,

γ_2 — удельный вес тёплого воздуха,

γ_1 — удельный вес холодного воздуха, окружающего столб тёплого воздуха.

Если эту силу выразить в $\kappa\text{г}/m^2$, как выражают обычно напор, то получим величину гидростатического напора:

$$H = \frac{P}{F} = s (\gamma_1 - \gamma_2) \kappa_2 / m^2. \quad (57b)$$

Из этого уравнения видно, что величина гидростатического напора тем больше, чем больше высота столба тёплого воздуха и чем меньше его удельный вес, который в свою очередь уменьшается при повышении температуры. Величиной гидростатического напора определяется интенсивность движения (циркуляция) воздуха в сушилках с естественной циркуляцией.

Сушилки с естественной циркуляцией воздуха бывают с организованной и неорганизованной циркуляцией.

Поступающий в сушилку горячий воздух, соприкасаясь с сушимыми ломтями хлеба, охлаждается, т. е. становится более тяжёлым. Мы уже отмечали, что водяные пары, которые вбирает в себя входящий в камеру горячий воздух, легче воздуха; поэтому влажный воздух при одинаковых температурах и одинаковом барометрическом давлении легче сухого, но в данном случае при соприкосновении с хлебом охлаждение воздуха сказывается на увеличении удельного веса воздуха значительно больше, нежели влияние водяных паров на его уменьшение, и в итоге охлаждённый влажный воздух имеет больший удельный вес, нежели тёплый и сухой воздух, входящий в сушильную камеру. За счёт разницы удельных весов охлаждённого и горячего воздуха в сушилке создаются восходящие и нисходящие потоки.

Кроме создания циркуляции в сушильной камере, гидростатический напор используется для отвода из сушилки отработанного воздуха через вытяжные трубы.

Сушильная камера при помощи вытяжных труб (деревянных или металлических) сообщается с наружным воздухом, и у основания вытяжной трубы за счёт разницы температур воздуха создаётся гидростатический напор.

Вытяжные трубы, как источники создания напора, имеют свои положительные и отрицательные стороны. К числу положительных сторон следует отнести простоту устройства, незначительную стоимость, отсутствие затрат по эксплуатации; к числу отрицательных сторон — относительно небольшой напор и, стало быть, недостаточно интенсивную циркуляцию воздуха в сушилке со всеми вытекающими отсюда последствиями; к недостаткам приходится отнести и зависимость напора от температуры наружного воздуха, что особенно неблагоприятно сказывается

вается на работе сушилки в условиях летнего режима, когда разность между температурой отходящего из сушилки воздуха и наружного значительно уменьшается, т. е. уменьшается гидростатический напор.

Побудительная циркуляция воздуха. Для усиления движения воздуха в сушильных установках пользуются искусственными побудителями. В качестве побудителей служат вентиляторы и эжекционные приборы.

Вентиляторы. Наиболее распространёнными побудителями движения воздуха являются вентиляторы, превращающие в напор механическую энергию.

Обычно вентилятор имеет две воздушные линии: линию всасывания, по которой воздух подходит к вентилятору, и линию нагнетания, по которой воздух отходит от вентилятора, причём в эти линии включается полностью весь участок пути от места забора воздуха до места его выброса.

Создаваемый вентилятором напор расходуется на преодоление местных сопротивлений трения на линиях всасывания и нагнетания и на создание скоростного напора выходящего воздуха.

В отдельных частных случаях может отсутствовать линия нагнетания или всасывания или та и другая вместе. В последнем случае весь создаваемый вентилятором напор расходуется на создание скоростного напора.

При наличии сопротивлений на линиях всасывания и нагнетания общий, развиваемый вентилятором напор H_v , разбивается на скоростной $H_{ск.в}$ и статический $H_{ст.в}$

$$H_v = (H_{ск.в} + H_{ст.в}) \text{ мм в. ст.} \quad (58)$$

Вентилятор получает от двигателя (электромотора) механическую энергию и отдаёт её в виде воздушного напора (энергии движения струи воздуха) в сети. Отдаваемая вентилятором полезная энергия (мощность), как и у всех машин, всегда меньше получаемой, так как часть получаемой вентилятором энергии тратится на преодоление сопротивления самого вентилятора при его вращении. Отношение отдаваемой вентилятором мощности к получаемой называется коэффициентом его полезного действия, обозначаемый буквой η .

Работа, как известно, исчисляется в килограммо-метрах, а мощность в килограммо-метрах в секунду. Полезная работа вентилятора в секунду равна произведению объёма воздуха, подаваемого вентилятором в одну секунду $v_{сек}$ (в $л^3/сек$), на полный напор вентилятора H_v (в мм в. ст. или в $кг \cdot м^2$), т. е. $v_{сек} \cdot H_v \text{ кгм/сек}$. Работа, которую потребляет вентилятор в секунду $= 75 \cdot N$, где N — мощность, потребляемая на валу вентилятора в лошадиных силах, 75 — эквивалент одной лошадиной силы в килограммо-метрах.

Таким образом, коэффициент полезного действия η вентилятора выразится:

$$\eta = \frac{v_{сек} \cdot H_v}{75 \cdot N} \quad (59)$$

Так как коэффициент полезного действия вентилятора определённого типа есть величина обычно известная, то, выяснив для данной сушильной установки потребное количество воздуха и необходимый напор и выбрав тип вентилятора, всегда можно из предыдущего выражения определить требующуюся мощность на валу вентилятора:

$$N = \frac{v_{сек} \cdot H_v}{75 \cdot \eta} \text{ л. с.} \quad (60)$$

В сушильных установках для сухарей применяются вентиляторы винтовые и центробежные.

Осевые или винтовые вентиляторы, как показывает само название, по принципу своего действия аналогичны гребному винту или пропеллеру (рис. 29).

В сухарных сушилках из винтовых вентиляторов применяются вентиляторы ЦАГИ.

Центробежные вентиляторы (рис. 30) состоят из вращающейся части — ротора с лопатками и неподвижной части — кожуха (улитки), направляющего движение воздуха.

Отверстие для всасывания воздуха расположено в боковой плоскости кожуха центрально по оси ротора; выхлоп воздуха производится из открытого конца кожуха.

При вращении ротора воздух через всасывающее отверстие поступает в пространство между лопатками и развивающейся центробежной силой отбрасывается к стенкам кожуха, т. е. внутри ротора создается разрежение, а в направляющем кожухе — повышенное давление. Благодаря улиткообразному очертанию кожуха воздух под влиянием напора плавно перемещается по кожуху к выхлопному отверстию.

В зависимости от создаваемого максимального статического напора центробежные вентиляторы делятся на:

- 1) вентиляторы низкого давления — $H_{ст}$ до 100 мм в. ст.,
- 2) вентиляторы среднего давления — $H_{ст}$ до 200 мм в. ст.,
- 3) вентиляторы высокого давления — $H_{ст}$ до 500—700 мм в. ст.

В сухарных сушилках применяются центробежные вентиляторы низкого и среднего давления типа «Сирокко» и Косточкина. Вентиляторы среднего давления отличаются от вентиляторов низкого давления меньшим диаметром всасывающего отверстия, большей массивностью ротора и меньшим числом лопаток.

При серийном изготовлении центробежных и винтовых вентиляторов размер их определяется диаметром ротора, причём за единицу номера принимается 100 мм, например, вентилятор с диаметром 500 мм имеет № 5.

Центробежные вентиляторы бывают правого и левого вращения.

Для больших номеров вентиляторов (от № 5 и выше) положение выхлопных отверстий фиксируется на заводе-изготовителе, у мелких номеров — кожух поворотный. Положение кожуха у больших вентиляторов имеет условное буквенное обозначение.

Производительность вентилятора при данном диаметре ротора определяется числом его оборотов. С уменьшением числа оборотов вентилятора изменяется режим его работы.

Основные показатели режима работы вентилятора:

число оборотов	n
объём воздуха	v
напор вентилятора	H_v
соотношение напоров	H_v и $H_{ст}$
потребная мощность	N
к. п. д.	η

Если вентилятор работает на определённую систему воздухопроводов, то изменение числа оборотов вызывает изменение его основных показателей по закону пропорциональности, а именно:

а) изменение объема воздуха, подаваемого вентилятором, пропорционально числам оборотов:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (61)$$

б) изменение общего напора, создаваемого вентилятором, пропорционально квадратам чисел оборотов:

$$\frac{H_{B_1}}{H_{B_2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \quad (62)$$

в) при неизменном к. п. д. потребляемая мощность на валу пропорциональна кубу чисел оборотов:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}. \quad (63)$$

Так как фактически при изменении числа оборотов изменяется и к. п. д. вентилятора, то последнее соотношение принимает вид:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \frac{\eta_2}{\eta_1}. \quad (63, a)$$

В действительности, основные показатели вентилятора связаны значительно более сложными зависимостями, которые выявляются специальными испытаниями вентиляторов и на основании их составляются особые характеристические диаграммы вентиляторов. Из этих диаграмм видно, что наиболее выгодный к. п. д. вентилятора получается при определенном сочетании числа оборотов n , напора H и объема v .

Детально с этим вопросом можно ознакомиться в специальных курсах.

Эжекционные приборы. Эжекционные приборы для усиления циркуляции воздуха в последнее время начинают проектироваться в сушарных сушилках. Эти

приборы, работающие воздухом, подаваемым центробежным вентилятором, хотя и имеют относительно невысокий к. п. д., однако в ряде случаев являются наиболее удобным видом побудителя движения воздуха.

Схема применения эжекционного прибора для приведения воздуха в сушилке в движение приведена на рис. 31. Как видно из этой схемы, воздух в сушильную камеру попадает через специальную эжекционную насадку. Струя воздуха, выходящая из этой насадки, вызывает циркуляцию воздуха в сушильной камере в направлении, показанном на рисунке стрелками. Часть воздуха при этом проходит через вентилятор и опять в эжекционную насадку. Большая же часть воздуха циркулирует внутри камеры.

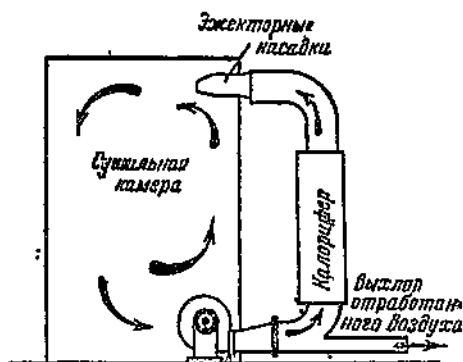


Рис. 31. Схема эжекторной сушилки

Тепловая система сушильной установки

Тепло, необходимое для сушильного процесса, сушильный агент — воздух — получает в специальных приборах — калориферах.

Калорифер — нагревательный прибор, который получает тепло от какого-либо источника и передает его воздуху.

Калориферы различаются:

а) по способу обогрева: они могут обогреваться газом, водой, паром, электричеством;

б) по материалу, из которого они изготовлены: калориферы керамические (кирпичные), металлические, комбинированные;

в) по конструктивному оформлению: гладкотрубчатые, из ребристых труб, пластинчатые.

Калориферы

В сухарных сушильных установках нашли применение калориферы металлические из гладких труб, керамические (кирпичные) и комбинированные из металлических гладких труб и кирпича.

Калориферы обогреваются горячими газами или паром и в зависимости от этого носят название огневого или парового.

Огневые калориферы имеют самостоятельную топку, откуда полученные при сжигании горячие дымовые газы поступают непосредственно в калорифер, или же обогреваются дымовыми газами, отходящими от какой-либо тепловой установки (хлебопекарных печей, паровых котлов и пр.).

При паровом обогреве калориферы получают пар от специальных котлов или от паровых котлов хлебозаводов, где установлены сушилки.

Наиболее экономичным способом обогрева является огневой, посредством отходящих от печей и котлов газов; при этом используется тепло, которое в противном случае выбрасывалось бы неиспользованным. Однако неудобство заключается в том, что при этом способе обогрева работа сушилки целиком связана с работой печей, максимальная производительность сушилки целиком зависит от мощности работающих печей или котлов.

В ряде случаев количество тепла отходящих газов бывает недостаточным для потребной производительности сушильного цеха, почему этот способ обогрева получил распространение для цехов относительно небольшой мощности.

Применение парового обогрева калориферов ограничено в ряде случаев как в силу недостатка паровых котлов, так и в силу недостаточно высокого давления пара в котельных установках (хлебозаводы, при которых организованы в настоящее время сушильные цехи, имеют котельные установки с рабочим давлением пара, в ряде случаев недостаточным для использования его в калориферах).

Наибольшее распространение в сухарных сушильных установках имеют огневые калориферы с самостоятельными топками.

Что касается компоновки калорифера с сушильной камерой, а равно калорифера с топкой, то здесь встречаются различные варианты. Встречается как сочетание в одно целое сушильной камеры, калорифера и топки, так и отдельно калорифера с топкой, и, наконец, сушильной камеры с калорифером и отдельно стоящей топкой.

Ниже приводится подробное описание конструкции одного из наиболее характерных калориферов; часть калориферов будет рассмотрена одновременно с описанием конструкций отдельных сушилок.

Огневой калорифер ФТЛ-ВНИИХ. Огневой калорифер запроектирован физико-теплотехнической лабораторией ВНИИХ на 2 тепловых производительности: 300 тыс. *Кал/час* и 500 тыс. *Кал/час*.

Конструкция обоих калориферов одинаковы и отличаются только габаритами (по длине).

Тепловоспринимающая (она же теплоотдающая) поверхность нагрева выполнена из чугунных труб диаметром 150/169 мм. Имеются варианты с трубами других диаметров.

Ниже даётся описание и основные характеристики огневого калорифера производительностью 500 тыс. *Кал/час* (рис. 32).

Проектное задание для калорифера было следующее: запроектировать калорифер для подогрева воздуха, обогреваемый дымовыми газами. Температура входящего в калорифер воздуха 40—50°, выходящего из калорифера 120°. Количество нагреваемого воздуха 21 тыс. *кг/час*.

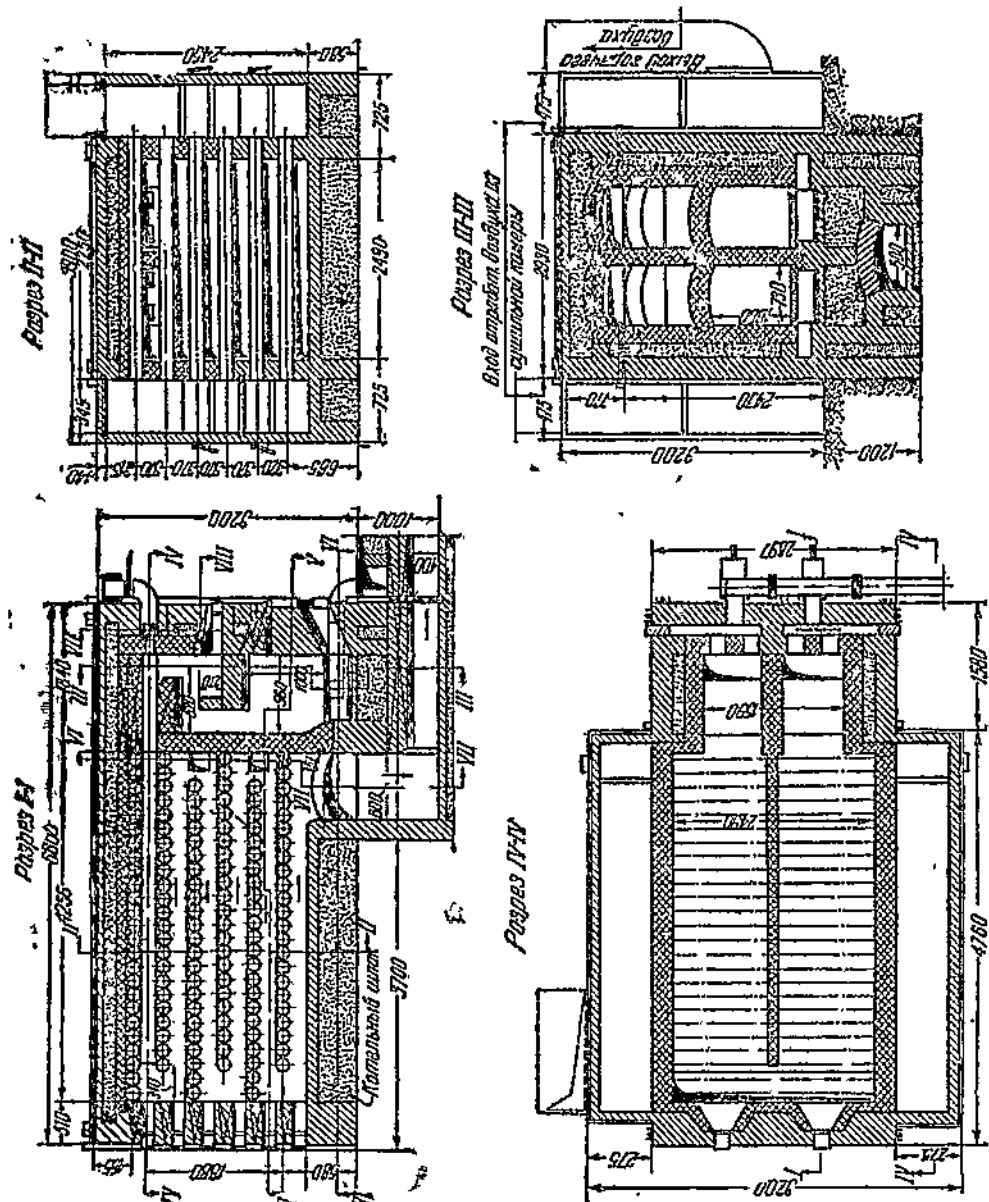


Рис. 32. Огневой калорифер ВНИИХ

Тепловая производительность калорифера 500 тыс. *Кал/час*. Горячие дымовые газы для обогрева калорифера получают из топки, составляющей одно целое с калорифером.

Калорифер представляет прямоугольную кирпичную камеру, включающую топку и поверхность нагрева калорифера.

Наружные габариты камеры: длина 6 600 мм, ширина 2 950 мм + 950 (на камеру), высота (со стороны топки) 3 200 мм.

Чугунные трубы диаметром 150/169 мм, составляющие поверхность нагрева калорифера, укладывают горизонтально вплотную друг к другу в 6 рядов по высоте по 23 трубы в ряд (в верхнем ряду 25 труб); всего 140 труб. Трубы своими концами укладываются на кирпичную кладку камеры. Полная длина каждой трубы 2950 мм.

Рабочая длина трубы, омываемая газами, — 2450 мм.

Омываемая поверхность нагрева одной трубы — 1,3 м².

Общая поверхность нагрева всех труб — $1,3 \cdot 140 = 182$ м².

Между рядами горизонтально уложенных труб образуются каналы, по которым проходят газы. Для чистки каналов с торцевой стороны, противоположной топочной камере, в кирпичной кладке камеры устраиваются люки.

Чтобы температура газов, поступающих в каналы, не превышала 900°, во избежание пережога труб предусматривается подача в верхнюю часть топки отходящих газов с примесью воздуха, подаваемых дымососом. Этим же дымососом осуществляется дутьё под колосники.

Отходящие из калорифера дымовые газы в смеси со свежим воздухом подаются по трубопроводам I и II в смесительную камеру для охлаждения поступающих в калорифер газов на топку и по трубопроводу III подаются под колосники для дутья.

Дымовые газы из топки, охлаждённые до температуры 900°, после прохождения через смесительную камеру поступают в верхний горизонтальный канал между трубами, последовательно проходят по всем горизонтальным каналам, после чего частично выбрасываются в дымовую трубу, а частично поступают в камеру смешения, куда подсасывается регулируемый шибером воздух. Подсос газов и свежего воздуха осуществляется вентилятором.

Подогреваемый воздух поступает одновременно в два верхних или в два нижних ряда труб (в зависимости от местных условий), затем проходит также по 2 рядам остальных труб. Для перехода воздуха из одних рядов труб в следующие с боковой стороны кладки против труб устроены каналы, перекрытые горизонтально расположенными листами.

Вентилятор, который подаёт воздух в сушильную камеру, устанавливается на горячем воздуховоде (после калорифера), т. е. калорифер (воздушный тракт) работает под разрежением.

Калорифер может работать на любом топливе.

Общий коэффициент теплопередачи калорифера $K = 5,2$ Кал/м² час°С.

Сопротивление калорифера: по газовой стороне 10,5 мм в. ст., по воздушной стороне 45,0 мм в. ст.

Расчёт калориферов

Тепловой расчёт. Тепловой расчёт калорифера сводится к выявлению поверхности нагрева, которая обеспечивала бы получение от калорифера необходимого для сушки количества тепла (горячего воздуха).

Поверхность нагрева всякого калорифера (парового и огневого) определяется из следующего основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t} \text{ м}^2, \quad (64)$$

где: F — поверхность нагрева калорифера в м²,

Q — количество тепла, получаемое от калорифера в Кал/час,

K — коэффициент теп. передачи калорифера в Кал/м² час°С.

Δt — средняя разность температур теплоносителя (дымовых газов или пара) и подогреваемого воздуха в °С.

Средняя разность температур Δt обычно для приближённых расчётов может быть принята как средняя арифметическая разность температур теплоносителя и нагреваемого воздуха:

$$\Delta t = \left(\frac{t'_m + t''_m}{2} - \frac{t'_n + t''_n}{2} \right) ^\circ\text{C}, \quad (65)$$

где: t'_m — температура теплоносителя при входе в калорифер,
 t''_m — температура теплоносителя при выходе из калорифера,
 t'_n — температура воздуха при входе в калорифер,
 t''_n — температура воздуха при выходе из калорифера.

Коэффициент теплопередачи k зависит от материала стенок калорифера (металл, кирпич и пр.), температуры стенок, характера движения воздуха и теплоносителя, скорости движения и ряда других факторов. Коэффициент k может быть найден или по специальным подсчётам, или для отдельных случаев по готовым графикам и таблицам.

Количество тепла, получаемое от калорифера в час, Q равняется:

$$Q = B (t''_n - t'_n) c_n, \quad (66)$$

где: B — часовое количество воздуха, проходящее через калорифер в кг ,
 t''_n и t'_n — температура воздуха при выходе и входе в калорифер в $^\circ\text{C}$,
 c_n — теплоёмкость воздуха в $\text{Кал/кг } ^\circ\text{C}$.

Подсчёт газовых и воздушных сопротивлений калорифера. Для движения газов и воздуха по калориферу необходим известный напор. Часть этого напора идёт на создание скорости движения, часть же тратится на преодоление сопротивлений (трения и местных). Весьма существенно знать величины этих сопротивлений для подсчёта мощности вентилятора и дымососа или дымовой трубы.

Подсчёт сопротивлений газовых и воздушных производится по приведенным ранее формулам (в главе о вентиляционной системе), т. е. сопротивление трения может быть подсчитано по формуле:

$$H_R = \rho \cdot \frac{u}{F} \cdot \frac{W^2 \gamma}{2g} \cdot l \text{ м. в. ст.},$$

а местные сопротивления по формуле:

$$H_\xi = \Sigma \xi \frac{W^2 \gamma}{2g} \text{ м. в. ст.}$$

Сушильная камера

Сушильная камера, являющаяся основным элементом сушильной установки, где происходит непосредственно процесс сушки, будет хорошо работать при соблюдении ряда условий, среди которых одним из главных является качество постройки и оборудования камеры.

Процесс сушки в камере происходит в условиях, значительно отличающихся от атмосферных, а именно при сравнительно высоких температурах воздуха и больших парциальных давлениях паров. Поэтому камеры должны иметь наружные ограждения (стены и двери) герметичные с минимально возможной потерей тепла. Отсутствие достаточной герметичности в камерах ведёт не только к излишнему расходу тепла, но может нарушить и процесс сушки.

Фундамент сушильной камеры должен удовлетворять общим требованиям строительного дела и должен быть рассчитан на всю передаваемую на него нагрузку.

Кроме того, фундамент в сушилках с подвалом должен быть в достаточной степени водонепроницаем как в отношении воздействия грунтовых вод снизу, так и влаги со стороны камеры.

Пол сушильной камеры обычно делается бетонным.

В тех случаях, когда грунтовые воды стоят высоко, необходимо применять самую тщательную гидравлическую и тепловую изоляцию фундамента, пола и камеры.

Конструктивные особенности камеры зависят от типа сушильной установки, предполагаемой длительности её работы, от местных условий и расчётного режима сушки.

В качестве материалов для постройки сушильных камер применяются дерево, бетон, кирпич. Почти, как правило, все конструкции сушильных камер, независимо от материала, из которого они изготовлены, имеют металлический (железный) каркас для придания соответствующей крепости сушильной камере. Иногда металлический каркас камер сушилок заполняется тем или иным изоляционным материалом. (Камера сушилки КС-2.)

Дерево в качестве материала сушильных камер не имеет широкого применения: оно огнеопасно, не выдерживает высоких температур, может загнивать в сырых концах камеры в сушилках непрерывного действия. Поэтому деревянные камеры для внедрения не рекомендуются.

Применение бетона для кладки стен сушильных камер широкого применения также не получило ввиду его большой тепло- и влагопроводности.

Наиболее часто применяемый материал при постройке сушильных камер — строительный красный кирпич. Кирпич для кладки стен должен быть хорошо обожжён. Не допускается в кладке кирпич пережжённый, слабо обожжённый и с песчаными прослойками. Трещины в кирпиче и отбитые углы допускаются в пределах ОСТ, кирпич с искривлённой поверхностью применяется в пределах установленных норм, но с обязательной подтёской и применением исключительно на неответственные части кладки.

Для кладки красного кирпича обычно применяется сложный раствор следующего состава:

- а) портландцемент — 1 часть,
- б) жирная известь — 2 части,
- в) речной песок — 6 частей.

Швы должны быть возможно тоньше.

На устройство и изоляцию потолочного перекрытия сушильных камер должно быть обращено особое внимание, так как в противном случае выделяющаяся из сухаря влага будет конденсироваться на внутренней поверхности потолка и, капая на сушимый продукт, будет вызывать неравномерность сушки и его порчу.

Толщина изолирующего слоя зависит от его теплопроводности. В качестве изоляционных материалов в сушильных камерах применяются:

- а) золит, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,18$,
 - б) шлаковая вата, коэффициент теплопроводности λ не выше 0,05,
 - в) диатом (трепел), коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,052—0,146$, применяется в тех местах, где невозможно проникновение сырости;
 - г) асбест применяется в виде асбестового картона, асбестита, который может быть применён или как обычный изоляционный материал, или как составная часть для термозоляционных штукатурок;
 - д) гарь (шлаки) и зола могут быть применены, но не засоренные посторонними материалами;
 - е) асботермит применяется для штукатурки.
- Стены и потолок камеры тщательно штукатурят.

Хорошо построенная сушильная камера уменьшает расход тепла на сушку, позволяет создать необходимый тепловой режим сушильного процесса и улучшает качество высушиваемого продукта.

Работа камеры во многом зависит от конструкции дверей и их состояния. Через двери происходит загрузка в камеру, сушеного хлеба и выгрузка готового сухаря.

Двери сушильной камеры должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) легко и свободно открываться и закрываться,
- 2) плотно прикрываться,
- 3) иметь малую теплопроводность,
- 4) не занимать много места при открывании.

Наиболее распространенным типом дверей в сухарных сушилках являются одно- и двухстворчатые двери. В этих дверях слабым местом являются линия смыкания створок, а также перекрытие отверстий в пороге для пропуска рельсов (в тоннельных сушилках). Створки двери делаются либо деревянные с обшивкой их с двух сторон железом, либо из металлической рамы с заполнением её изоляционным материалом и последующей обшивкой обеих сторон листовым железом. Так как плотного прилегания створок двери к раме достигнуть одной тщательностью изготовления и пригонкой невозможно, тем более что эта пригонка легко нарушается в период эксплуатации, то для герметизации дверей применяются уплотняющие прокладки.

Для уплотняющих прокладок пользуются резиной, пенькой, асбестовым шнуром, картоном.

Створные двери обязательно снабжаются приспособлениями для запирания.

Этими приспособлениями большею частью являются обычные шпингалеты или защелки. Разработаны специальные конструкции приспособлений для запирания.

Верхние и нижние запоры должны работать отдельно, так как запирать их одновременно, в случае покоробления двери, затруднительно.

Кассеты и вагонетки

Нарезанные ломти хлеба укладывают на кассеты, а последние на вагонетки (в тоннельных сушилках) или же кассеты ставятся одна на другую в несколько рядов (в тупиковых сушилках).

В зависимости от температуры сушильного воздуха могут быть использованы кассеты либо целиком деревянные, либо деревянные с металлической сеткой, либо целиком металлические.

На рис. 33 мы, в виде примера, приводим изображения отдельных типов кассет.

Деревянные кассеты по противопожарным соображениям нельзя применять при температуре сушильного воздуха, превышающей 100°.

Кассеты могут быть как для горизонтальной, так и для вертикальной укладки ломтей.

Кассеты изображенные на рис. 33, а, б и в, рассчитаны на вертикальную укладку в них ломтей хлеба.

Расстояние между поверхностями ломтей хлеба, уложенных в кассету, должно составлять 10—15 мм.

В ряде сушилок предусмотрена укладка ломтей на кассеты плашмя. На рис. 33, г изображена цельнометаллическая кассета для горизонтальной укладки ломтей хлеба, применяемая в сушилках ВГСЭ.

На рис. 34 мы приводим изображение вагонетки для кассет с ломтями хлеба, применяемой в тоннельных сушилках ВНИИХ.

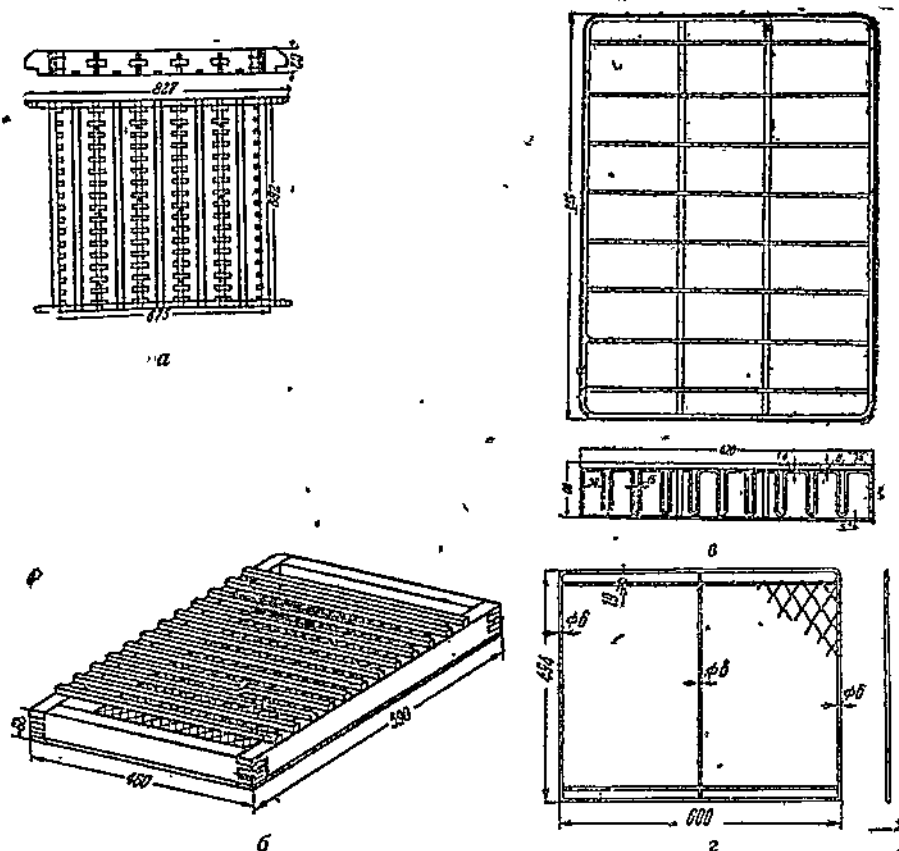


Рис. 33. Кассеты для сухарей:
 а—цельнодеревянная; б—деревянная с металлической сеткой; в—цельнометаллическая;
 г—к сушилке БГСЗ

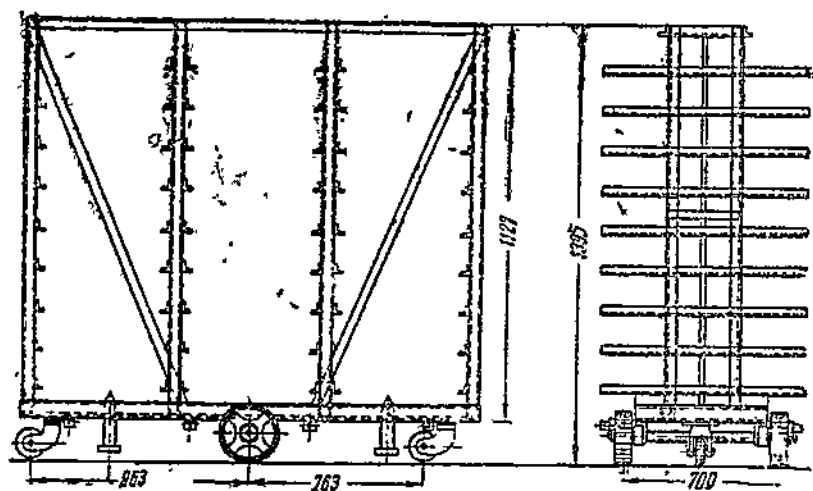


Рис. 34. Вагонетка для кассет с сухарями

IX. СУШИЛКИ ДЛЯ СУХАРЕЙ

Типы и системы сушилок

Количество типов и конструкций сушилок, в том числе и сухарных, очень велико.

Все существующие сушилки могут быть разбиты на группы по ряду признаков.

А. По характеру сушильного агента сушилки могут быть:

1) воздушные, в которых сушильным агентом служит нагретый воздух, являющийся сушильным агентом почти во всех имеющих практическое промышленное применение сухарных сушилках;

2) газовые, в которых сушильным агентом являются дымовые газы; сухарные сушилки этого типа пока широкого применения не нашли.

Б. По характеру подогрева воздуха и использования его в сушильной камере сушилки могут быть:

1) с обогревом непосредственно в сушильной камере, когда нагревающие воздух поверхности находятся в сушильной камере;

2) с калорифером, где производится предварительный подогрев воздуха, и однократным использованием воздуха в сушильной камере;

3) с возвратом из сушильной камеры в калорифер для вторичного подогрева части отработанного воздуха и частичного забора свежего воздуха;

4) с промежуточным обогревом.

В. По характеру загрузки и выгрузки высушиваемого продукта сушилки могут быть:

а) периодического действия,

б) непрерывного действия.

В сушилках периодического действия ломти хлеба загружаются периодически на всю ёмкость сушильной камеры или на определённую её часть и во всё время сушки лежат неподвижно (на стеллажах, кассетах и пр.). Обычно в сушилках этого типа выгрузка готового сухаря производится на том же конце сушильной камеры, что и загрузка. После окончания процесса сушки камера разгружается и затем загружается новыми ломтями хлеба. Таким образом, в этих сушилках различается период загрузки хлеба, период сушки и период выгрузки сухаря.

В сушилках непрерывного действия ломти хлеба поступают к месту загрузки в камеру, продвигаются во время процесса сушки по камере и выходят к месту разгрузки.

Ломти хлеба в сушилках этого типа поступают или через строго установленные и определённые промежутки времени (при сушке на вагонетках) или могут поступать непрерывно (при сушке на конвейере). Сухарных сушилок последнего типа (конвейерных) имеется пока незначительное количество.

Г. По характеру движения воздуха в сушильной камере различают:

1) вертикальное движение воздуха сверху вниз, снизу вверх (обычно в сушилках периодического действия);

2) горизонтальное движение воздуха (в тоннельных сушилках непрерывного действия).

Д. По характеру направления движения воздуха относительно направления движения сушимого продукта (в сушилках непрерывного действия) различают:

1) противоток, когда горячий воздух поступает в сушильную камеру со стороны выгрузки из камеры сухаря;

2) параллельный ток, когда воздух входит в камеру со стороны загрузки хлеба.

Е. По способу создания напора для перемещения воздуха могут быть:

1) сушилки с естественной циркуляцией воздуха, основанные на естественном стремлении нагретого, более лёгкого воздуха подниматься вверх, а охлаждённого опускаться вниз. Сушилки этого типа встречаются с неорганизованной и организованной циркуляцией воздуха;

2) сушилки с принудительной циркуляцией воздуха, где перемещение воздуха создаётся искусственным путём, для чего используются различного рода вентиляторы (центробежные, крыльчатые и пр.).

Сушилки первой группы не требуют для своей работы расхода энергии на создание движения воздуха, но зато сушилки второй группы дают возможность увеличивать скорость и количество циркулируемого воздуха, что в свою очередь влияет на скорость протекания процесса сушки.

Сушилки 1-й группы можно для краткости называть безвентиляторными, 2-й группы — вентиляторными.

Ж. По типу сушильных камер сухарные сушилки бывают:

1) шкафные, для сушилок периодического действия,

2) камерные (тупиковые),

3) тоннельные (коридорные), для сушилок непрерывного действия.

3. Наконец, по способу обогрева калориферов различают сушилки:

1) с паровым обогревом — при обогреве калорифера паром;

2) с огневым обогревом — при обогреве калорифера дымовыми газами от специально установленной топки или отходящими дымовыми газами от имеющейся какой-либо тепловой установки (котлов, печей и пр.);

3) с электрическим обогревом.

Ниже мы приводим описание и характеристики наиболее распространенных в сухарных цехах вентиляторных сушилок и безвентиляторной сушилки Ширенкова и Борисова.

Тоннельные сушилки ФТЛ-ВНИИХ

Физико-технической лабораторией Всесоюзного научно-исследовательского института хлебопечения в 1940 г. была разработана конструкция тоннельной сушилки с железотрубным огневым калорифером, размещённым между двумя тоннелями сушилки, работающей по принципу противотока, с проектной мощностью 8 т сухарей в сутки. Конструкция этой сушилки была разработана в нескольких вариантах (рис. 35).

1) марки СОТ с отдельной от сушилки топкой и размещением сушилки в одном этаже; вентилятор и дымосос в этом варианте монтируются на полу сбоку от тоннелей сушилки;

2) марки СВВ с расположением вентилятора над сушилкой и также с отдельной топкой и размещением сушилки в одном этаже;

3) марки СБТ с боковой топкой, непосредственно примыкающей к кладке сушилки, с расположением дымососа и вентилятора на полу, рядом с сушилкой и также с размещением всей сушилки в одном этаже;

4) марки СПТ с подвальной топкой, с расположением топки вентилятора и дымососа под сушилкой в подвальном этаже.

Не задаваясь целью описания всех упомянутых марок тоннельной сушилки ВНИИХ, мы ограничимся описанием сушилки марки СПТ и её эксплуатационной характеристикой.

Сушилка СПТ (рис. 36) представляет двухтоннельную сушилку с железотрубным калорифером, расположенным между тоннелями сушилки и топкой, вентилятором, расположенными в подвальном этаже.

Длина сушилки — 11,25 м, ширина — 8,5 м и высота, включая и подвальную часть сушилки, на посадочном конце сушилки — 6 м, на выгрузочном конце — 5,45 м.

Сушильные камеры имеют в свету ширину 1 м, высоту 1,95 м и рассчитаны на размещение в каждой из них 5 вагонеток. Вагонетка (см. рис. 34) вмещает 54 кассеты по 48 ломтей хлеба на каждой, при вертикальной их укладке.

Таким образом, сушилка вмещает в обоих тоннелях на 10 вагонетках 540 кассет с 25 920 ломтями хлеба-сухаря, следовательно, при весе сухаря в 75 г в сушилке одновременно помещается 1,944 кг продукта.

Для того чтобы кассеты с ломтями хлеба не выходили за пределы габарита вагонетки и не задевали за стенки сушилки, угольники, на которые задвигаются кассеты, целесообразно делать с небольшим наклоном к внутренней части вагонетки.

В ряде сушилок ВНИИХ в последнее время применяются вагонетки не с 9, а с 10 рядами кассет по высоте сушилки, вмещающие не 54, а 60 кассет. Помимо этого, с целью более равномерной сушки сухарей, расстояние между рядами кассет по высоте вагонетки в центральной части вагонетки целесообразно делать большим, нежели в верхней и нижней частях вагонетки.

Для облегчения перемещения вагонеток внутри тоннеля направляющие из швеллерного железа уложены на полу тоннеля с уклоном 5 мм на погонный метр в сторону перемещения вагонеток.

Нагревание сушильного воздуха производится в трубчатом калорифере, расположенном между сушильными тоннелями. Калорифер состоит из 70 газовых 2"-труб, с общей поверхностью нагрева 100,7 м².

Для лучшего омывания воздухом труб калорифера по его длине расположены четыре направляющих воздух перегородки. Через калорифер воздух просасывается центробежным вентилятором типа «Сирокко» № 6½, среднего давления. Пройдя калорифер, воздух вентилятором нагнетается в сушильные камеры через отверстия с решётками, расположенными в полу выгрузочного конца тоннелей. Отработанный воздух, пройдя тоннели, удаляется через отверстия в верхнем загрузочном конце сушильной камеры.

Примерно одна десятая часть отработанного воздуха выбрасывается через вытяжной зонт в атмосферу. Остальная часть отработанного воздуха опять засасывается в калорифер, пройдя который дополняется частью свежего, забираемого из атмосферы воздуха и вентилятором опять нагнетается в сушильные камеры.

Для обогрева воздуха в трубы калорифера из топки поступают топочные газы, прошедшие вертикальные газоходы, выполняющие роль осадителей зола, вместе с поступающей из бокового канала газовой смесью, состоящей из воздуха и прошедших уже калорифер отработанных дымовых газов.

Смесь газов, поступающих в калорифер, должна иметь температуру не выше 750°. Более высокая температура влечёт за собой пережог труб калорифера. Пройдя калорифер, дымовые газы по газоходам направляются к вентилятору-дымососу (типа «Сирокко» № 3 среднего давления). На пути к вентилятору дымовые газы разбавляются известным количеством свежего воздуха, засасываемого через специальное отверстие, регулируемое шибером. Смесью дымовых газов и воздуха дымососом нагнетается частично в смесительную камеру перед калори-

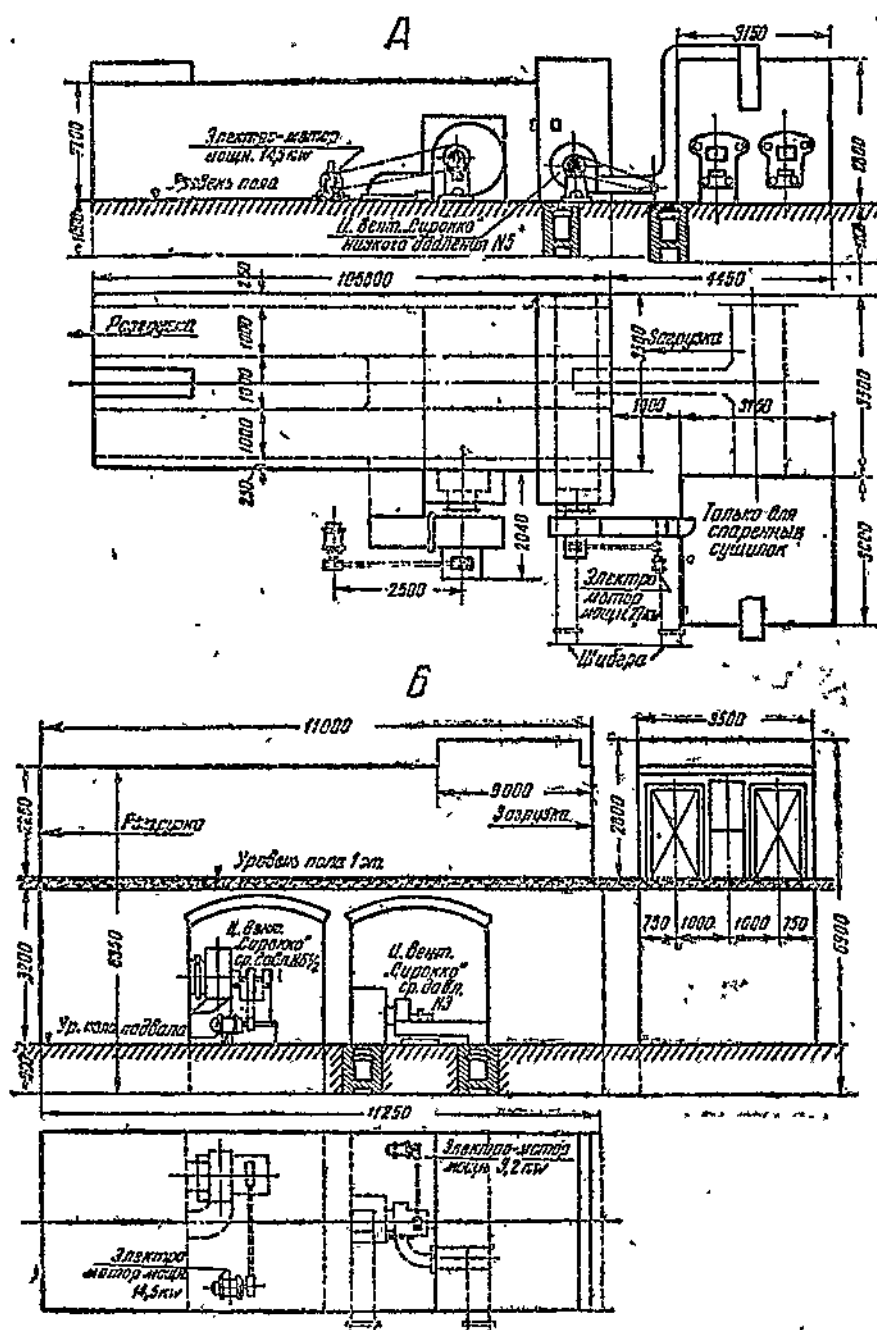


Рис. 35. Схема взаиморасположения основных устройств сушилок ФТЛ-ВНИИХ:

А—сушилка с огненным калорифером ССТ. Вариант с 4"-трубами. Производительность 8 т сухарей в сутки; поверхность, омываемая газами, 95 м²; количество стальных труб 40; длина труб 8750 мм.

Б—сушилка с подовальной топкой-СПТ. Вариант с 2"-трубами. Производительность 8 т сухарей в сутки; поверхность, омываемая газами, 89 м²; количество газовых труб 70; длина труб 8370 мм.

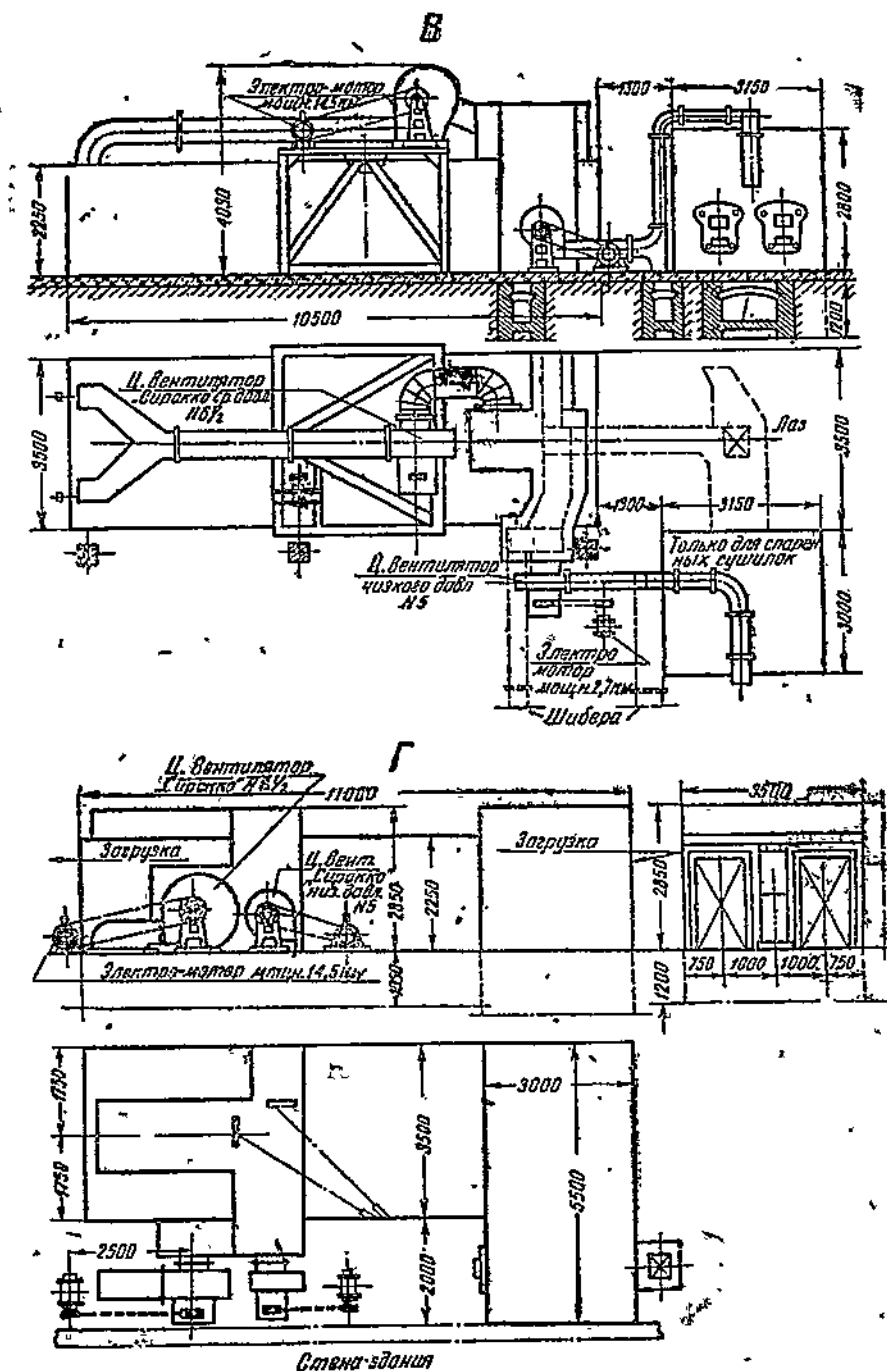


Рис. 35. Схема взаиморасположения основных устройств сушилок ФТД-ВНИИХ:

В—сушилка с огненным калорифером с расположением вентилятора под сушилкой СВВ. Вариант с 4^х-трубами. Производительность 8 т сухарей в сутки; поверхность, омываемая газом, 95 м²; количество стальных труб 40; длина труб 8700 мм.
 Г—сушилка с огненным калорифером с боковой топкой СВТ. Вариант с 2^х-трубами. Производительность 8 т сухарей в сутки; поверхность, омываемая газом 39 м²; количество газовых труб 70; длина труб 8370 мм.

фером, частично под колосниковую решётку для дутья, частью в дымоход для выброса в атмосферу.

Сушилки СПТ были испытаны в двух местах их установки в пункте О и в пункте Г.

В пункте О сушилка СПТ была испытана на хлебе из пшеничной обойной муки, а в пункте Г — на хлебе из ржаной обойной муки. Основные показатели испытания этих сушилок приведены в табл. 11.

Таблица 11

Показатели	Сушилки СПТ в пункте:	
	О	Г
Суточная производительность (в т сухаря)	10,1	8,05
Количество испаряемой в кг влаги (в кг/час)	228,5	233,0
t воздуха, поступающего в тоннель (в °С)	152	115
φ воздуха, поступающего в тоннель (в %)	11	8
t_c воздуха, выходящего из тоннеля (в °С)	82	74,5
φ воздуха, выходящего из тоннеля (в %)		
Общий расход тепла на испарение 1 кг влаги	26	32
(в Кал. и %)	1135 (100%)	1958 (100%)
в т. ч. а) расход на испарение (в Кал и %)	616 (54%)	630 (32,2%)
б) на прогрев продукта	54 (4,7%)	36 (1,8%)
в) потеря в окружающую среду	168 (11,7%)	470 (24%)
г) с отработанным воздухом	185 (16%)	180 (9,2%)
д) тепла калорифером	25,4%	642 (33%)
к. п. д. калорифера	0,746	0,67
сушильных камер	0,541	0,506
всего агрегата	0,404	0,339
Род топлива	антрацит	дрова
Расход тепла на 1 т сухаря (в Кал)	665 000	1 360 000
условного топлива в кг на 1 кг испаренной влаги	0,217	0,27
условного топлива в кг на 1 т сухаря	118	186
Количество воздуха в кг на 1 кг испаренной влаги	58	94
Скорость воздуха в живом сечении тоннеля (в м/сек)	2,1	3,4

Следует учитывать, что в обычных эксплуатационных условиях удельный расход топлива на этих сушилках значительно выше.

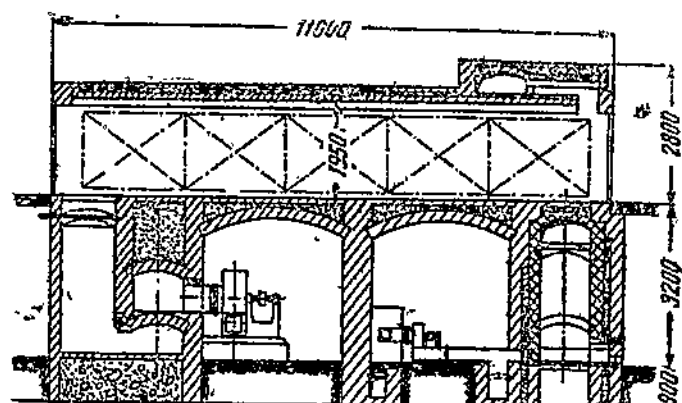
Тоннельная сушилка БГСЭ

Сушилка БГСЭ (рис. 37), запроектированная тт. Байковым, Гриншпун, Соловьевым и Эльберт, представляет двухтоннельную сушилку, работающую по принципу параллельного потока воздуха и сушеного продукта. Для нагрева сушильного воздуха под тоннелями в подвальной части сушилки расположен огневой калорифер с топкой.

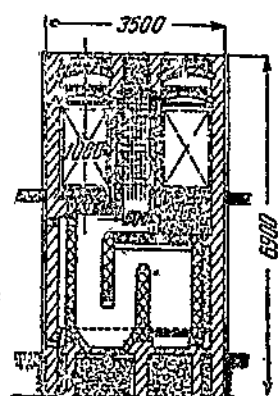
При спаренном расположении двух сушилок БГСЭ топочное устройство двух сушилок расположено с одной боковой стороны подвальной части сушилки. Каждая из сушилок обслуживается самостоятельной топкой, выходящие газы обеих сушилок поступают в общий сборный боров и по нему в дымовую трубу.

Топка сушилки оборудована горизонтальной ручной колосниковой решёткой и рассчитана на сжигание как дров, так и угля. Калорифер состоит из керамиковой и железотрубной части. Керамиковая часть калорифера представляет систему воздушных каналов в кладке, окружающих со всех сторон газоход, идущий от топки до железотрубной части калорифера.

Железотрубный калорифер состоит из 16 секций дымогарных труб

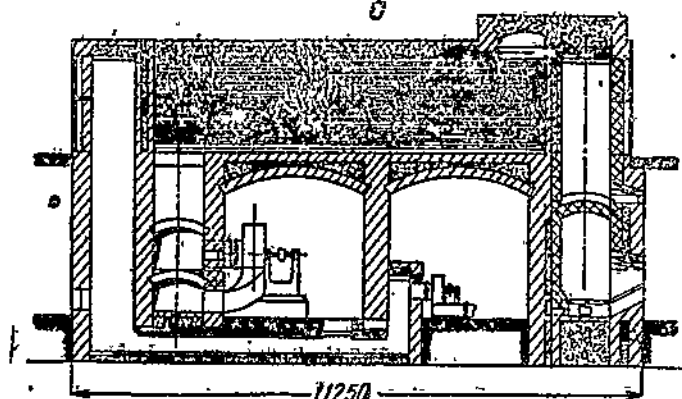


а

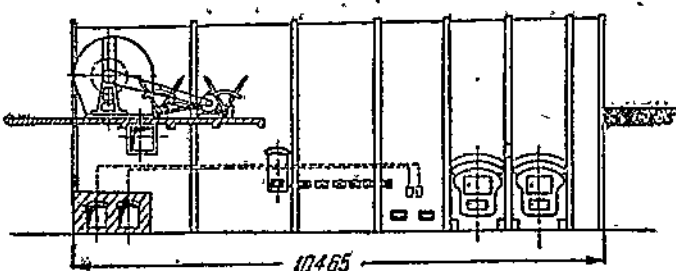


б

Рис. 36. Сушилка
ОПТ ФТЛ-ВНИИХ



а



б

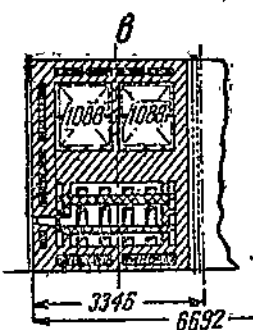
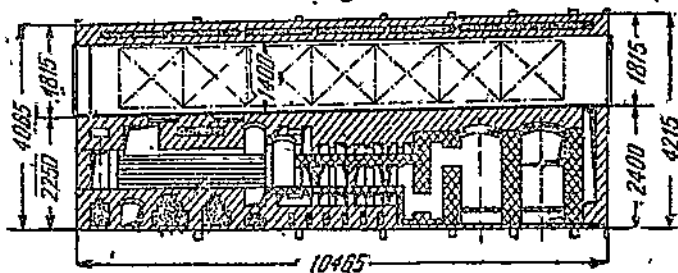


Рис. 37. Сушилка
БГСЭ



(по 6 труб в каждой). При длине труб в 2,95 м и диаметре их в 76 мм общая поверхность паровой железотрубной части калорифера равна 67,5 м².

Топочные газы сперва проходят керамиковую часть калорифера и затем уже несколько охлажденные поступают в железотрубную часть внутри дымогарных труб. По выходе из труб калорифера газы поступают в сборный боров и по нему в дымовую трубу. Сушильный воздух, наоборот, сперва омывает наружную поверхность дымогарных труб и затем поступает в воздушные ходы керамикового калорифера, после чего поступает в сушильные тоннели. Пройдя сушилку, отработанный воздух в конце тоннеля забирается вентилятором типа «Сироко» № 6¹/₂ среднего давления и вновь нагнетается в калорифер. Часть отработанного воздуха идет на выброс и заменяется эквивалентным количеством воздуха, забираемого из помещения сушильного цеха.

По данным испытания одной из двух спаренных сушилок, проведенного физико-технической лабораторией ВНИИХ в 1941 г., в сушильные тоннели поступало в час 14 890 кг воздуха температурой 147° и относительной влажностью 11%. Из тоннелей сушилки выходило в час 16 400 кг воздуха температурой 86° и относительной влажностью 23%. Из этого количества шли на выброс 2,610 кг воздуха. Остальной воздух вместе со свежабразанным шел в порядке рециркуляции в калорифер сушилки. В каждом тоннеле помещалось по 7 вагонеток, следовательно, всего 14 вагонеток, с 96 кассетами на каждой. Если считать, что на каждую кассету загружается 24 ломта и каждый ломоть в виде готового сухаря весит 75 г, то количество одновременно находящегося в сушилке продукта равно 2419 кг.

При шестичасовой сушке и указанных выше параметрах воздуха и скорости воздуха в тоннелях у поверхности сухарей 2,5—3 м/сек. суточная производительность сушилки была равна 8 т.

Следует отметить, что в продукции данной сушилки БГСЭ за время испытания было 11,4% брака, в том числе сухарей горелых 7,2%.

Исходя из этого, на сухарном комбинате в другом городе, также оборудованном сушилками БГСЭ, работают при более низкой температуре сушильного воздуха (130—135° при поступлении в сушилку, вместо 147° указанных выше). Сушилки этого типа нашли себе в наших сухарных цехах очень ограниченное применение.

Тоннельная сушилка ГИПРОХЛЕБ

Для сушки сухарей применяются также запроектированные ГИПРОХЛЕБ, тоннельные сушилки, работающие по принципу противотока. Сушилки эти имеют по два тоннеля длиной 21 м, шириной 1,01 м и высотой 1,79 м. В каждом тоннеле сушилки вмещается по 10 вагонеток.

На каждую вагонетку загружается 54 кассеты, а в каждую кассету вертикально укладывается по 50 ломтей хлеба.

Сушильный воздух в этих сушилках обогревается либо паровыми калориферами, либо отдельно от сушильных камер располагаемым огневым калорифером конструкции ВНИИХ из чугунных труб диаметром 150/169 мм, с общей поверхностью нагрева 175 м².

Такой огневой калорифер имеет длину 6,6 м, ширину — 3,9 м и высоту 3,2 м. Температура воздуха, поступающего в сушилку ГИПРОХЛЕБ, около 110°, а относительная влажность — около 6% (в зависимости от процента рециркулирующего воздуха). При выходе из сушилки воздух имеет температуру около 70° и относительную влажность около 30%.

Скорость воздуха в живом сечении тоннеля равна 2 м/сек. При этом режиме сушка ржаных сухарей длилась во время испытания около 10 часов и суточная производительность сушилки была равна 10 т.

При огневом калорифере ВНИИХ в сушилке испарялось в час 337 кг влаги.

При этом на испарение 1 т влаги расходовалось тепла 1 540 000 Кал и 220 кг условного топлива.

На 1 т сухаря расходовалось условного топлива 175 кг,

к. п. д. калорифера 0,79,

к. п. д. сушильных камер 0,5,

к. п. д. всего агрегата 0,395.

Большая длина сушильных тоннелей делает затруднительным подбор помещения для установки этой сушилки и перемещение вагонеток с сушимым продуктом по ее тоннелям.

Сушилка КС-2

Сушилка марки КС-2 (в модернизированном виде марки КС-П), выпускавшаяся заводом им. Артёма (Киев), представляет двоячную камерную сушилку периодического действия шкафного типа с замкнутой циркуляцией воздуха.

Принципиальная схема этой сушилки, приспособленной для сушки сухарей в её модернизированном виде, приведена на рис. 38.

Сушилка представляет прямоугольную конструкцию длиной 3,125 м, шириной 2,125 м и высотой 3,095 м. Каркас сушилки состоит из двух половин, представляющих цельносварные конструкции. Стенки и потолки сушилки разборные из отдельных железных щитов с теплоизолирующим заполнением шлаковой ватой.

Сушилка имеет две сушильные камеры, в каждую из которых закатывается вагонетка с сушимым продуктом. Над сушильными камерами расположены вентиляторы и паровые калориферы. Циркуляция воздуха в сушилке КС-П происходит следующим образом.

Свежий воздух поступает в сушилку (рис. 38) через два защищенных сетками отверстия 1, расположенные на боковых стенках сушилки у подшипников вала вентиляторов 2 ЦАГИ диаметром 700 мм.

Лопастей обоих вентиляторов насажены на один вал, вращающийся в шариковых подшипниках 3, смонтированных на боковых рамах каркаса сушилки.

Вал вентиляторов эластичной дисковой муфтой соединён с валом электромотора 4 мощностью 2,2 кВт, делающим 1450 об/мин.

Эти вентиляторы обеспечивают в камерах сушилки циркуляцию 20 тыс. м³ воздуха в час при скорости воздуха у продукта 2—3 м/сек.

Воздух, проходя паровые калориферы 5 с поверхностью нагрева по 49 м², прогревается и направляется в них в межкамерное пространство, из которого направляющими щитками 6 направляется между кассетами с ломтями хлеба.

Основная часть воздуха, охлаждённого и увлажнённого при проходе между кассетами с сушимым продуктом, поднимается вверх и венти-

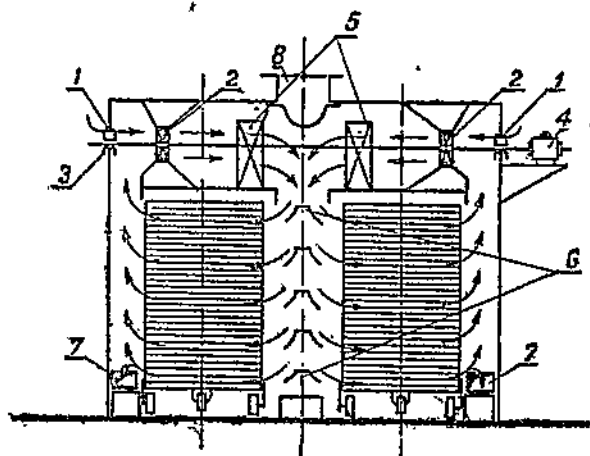


Рис. 38. Схема сушилки КС-П

ляторами 2 опять прогоняется через калориферы и через слой продукта. Часть воздуха (около 1:20) через отверстия 7 по специальным воздуховодам поступает в вытяжную трубу.

Количество выбрасываемого воздуха регулируется положением шиберов в вытяжной трубе.

В каждой из двух камер сушилки шириной 1,315 м, высотой 1,775 м и длиной 2,125 м помещается по одной вагонетке. На каждой вагонетке размещается 108 металлических кассет. На каждую кассету горизонтально укладываются ломти хлеба.

В результате испытания сушилки КС-2, при давлении пара 2,8 ат, были получены следующие показатели её работы:

1) одновременная загрузка хлеба на 2 вагонетки — 756 кг; 2) средняя абсолютная влажность целого хлеба — 71,5% и средняя абсолютная влажность сухарей в момент выгрузки — 4,8%; вес одновременно выгружаемых из сушилки с двух вагонеток сухарей — 445 кг; 3) при 3,8 атл среднего давления пара средняя температура воздуха при входе в кассеты — 107° (в начале процесса сушки — 80°, в конце процесса сушки — 121°), температура поступающего в сушилку воздуха 26° и средняя температура выбрасываемого из сушилки воздуха 90°, длительность сушки была равна 4 час. 30 мин.; 4) объём воздуха, циркулирующего в сушилке, был равен 20 тыс. м³/час; 5) количество воздуха, выбрасываемого из сушилки, было равно 1 000 м³/час; 6) производительность сушилки за 22,5 часа работы в сутки 2 380 кг; 7) на 1 кг испаренной влаги расходовалось: пара 2,08 кг, электроэнергии 0,028 кВт, тепла 1 020 Кал.

На 1 т сухарей расходовалось пара 1 513 кг, электроэнергии 19,94 кВт, тепла 734 000 Кал.

При изменении давления пара естественно изменяются температура воздуха в сушилке и длительность сушки. Так например, для сушилки данного типа установлена зависимость между средней температурой

Таблица 12

Средняя температура воздуха в сушилке в °С	Длительность сушки сухарей в часах
60—70	7
70—80	6
80—90	5
90—110	4,5
110—130	4

воздуха в сушилке и длительностью сушки сухарей, иллюстрируемая цифрами, приводимыми в табл. 12.

В целях большей равномерности сушки рекомендуется после, примерно, трёх четвертей всего срока сушки повернуть вагонетки в камере на 180°.

Сушилки типа КС-II (или типа КС-2), рассчитанные на обогрев паром, могут работать и с использованием воздуха, нагреваемого в специальном огневом калорифере.

При этом горячий воздух поступает в сушилку не через боковые отверстия 1 (заглушаемые), а через патрубок 8 в верхней части сушилки.

Во всём остальном работа сушилки не изменяется.

Эжекционные сушилки

Эжекционные сушилки небольших габаритов с тупиковыми камерами и производительностью 2,5—3 т сухарей были запроектированы лабораторией кондиционирования воздуха Всесоюзного научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности с нагревом сушильного воздуха как паровым, так и специальным огневым калорифером. Ввиду того что эти сушилки не нашли ещё распространения в хлебо-

пекарной промышленности, мы отсылаем интересующихся их конструкцией к соответствующим отчётам ВНИИХП за 1942 г.

Безвентиляторные сушилки

В качестве простейшей безвентиляторной сушилки может служить замкнутое помещение со стеллажами для сухарей и печью для нагревания воздуха, схематически изображенное на рис. 10 и описанное на стр. 19 или же на рис. 51, стр. 25.

За последнее время был запроектирован ряд безвентиляторных сушилок минимальных размеров и удобных для сооружения в пунктах, где нет возможности использовать электроэнергию и возводить специальные здания.

Из конструкций этого типа можно назвать сушилки: 1) Ширенкова и Борисова (Московский монтажно-механический комбинат), 2) Краснопевцева (ФТЛ-ВНИИХ), 3) Дегтярёва (ЛКВ-ВНИИХ), 4) Гриншпуна (Росглавхлеб), 5) Павперова и Угарова (Пищепромпроект) и 6) Ауэрмана (МТИПП) и Нудельмана (ВНИИХ) марки АН-1.

Поскольку известное распространение в промышленности пока нашла только сушилка Ширенкова и Борисова, мы, здесь ограничиваемся только её описанием¹.

Сушилка системы Ширенкова и Борисова

Сушилка (рис. 39) представляет кирпичную камеру длиной 7 830 мм, шириной 3 205 мм и высотой 2 680 мм.

Боковые стены камеры выполнены в 1,5 кирпича, верхнее перекрытие состоит из отдельных кирпичных сводов по железным уголкам, крепящимся на металлическом каркасе сушилки с засыпкой трепелом или шлаковой ватой и выстилкой сверху кирпичом плашмя.

Камера разбита внутри на 10 отделений-шкафов с направляющими для кассет из углового железа, приваренными к металлическим стойкам каркаса. Шкафы разделяющих стенок не имеют. Каждый шкаф закрывается отдельной деревянной дверью; двери и рамы, обшитые с обеих сторон кровельным железом, крепятся к деревянным рамам, прикреплённым к каркасу сушилки.

Кассеты (металлические) типовые Ленмехзавода (590×470 мм), вместимостью по 50 ломтей, укладываемых вертикально.

В каждый шкаф загружается по высоте камеры 9 рядов кассет, в каждый ряд по глубине камеры — 5 кассет. Общее количество кассет, загружаемых одновременно во все 10 шкафов сушильной камеры, — 450.

Калорифер с самостоятельной топкой расположен под сушильной камерой. Он состоит из кирпичного борового внутреннего сечением 500×500 мм, длиной 5 540 мм и 20 дымогарных труб 102/94 мм, длиной 5 900 мм (полезная длина 5 410 мм). Калорифер имеет три газохода: боров и две дымогарные трубы.

Дымовые газы из топки поступают в боров, уложенный на шанцах, идущий вдоль сушильной камеры под ней с фасадной стороны.

Пройдя боров, газы поворачивают на 180° и, последовательно пройдя две трубы калорифера, уходят в дымовую трубу.

Свежий воздух поступает из шахты, расположенной сбоку сушильной камеры со стороны топки и входит в кирпичный канал, идущий вдоль сушильной камеры под трубами калорифера.

¹ Сушилка АН-1 описана в книге Л. Я. Ауэрмана, Технология хлебопечения Пищепромиздат, 1942.

Канал, открытый сверху по всей длине, перекрыт свободно лежащими пластинками для лучшего и равномерного распределения поступающего из канала под калорифер воздуха. Из этих же соображений сечение канала сделано постепенно суживающимся.

Выйдя из канала, воздух расходится по всему сечению и поднимается вверх, омывая трубы и боров снизу (через шланцы) и с боков. Нагретый свежий воздух поступает в сушильную камеру, смешиваясь с находящимся там воздухом.

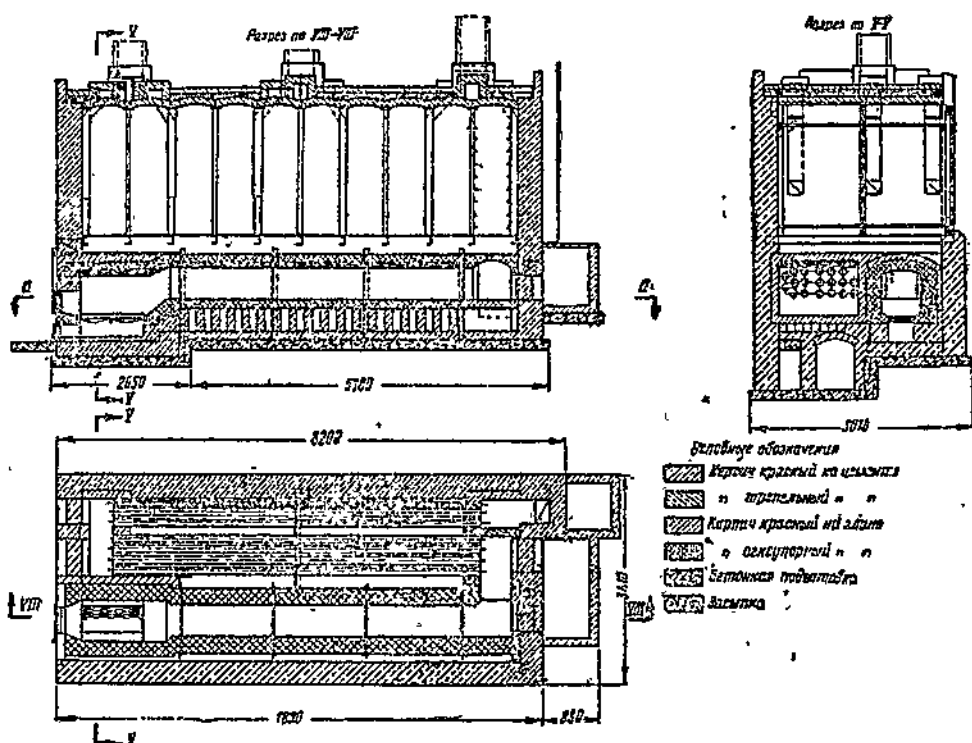


Рис. 39. Сушилка Ширенкова и Борисова

Поднимаясь кверху, смесь теплого воздуха производит сушку, охлаждается и опускается вниз. Здесь часть отработанного воздуха отсасывается, а оставшаяся часть нагревается лучистой теплотой от калорифера, смешивается с новой порцией подогретого свежего воздуха и вновь поднимается кверху.

Отсос отработанного воздуха производится с помощью системы из 18 железных вытяжных каналов сечением 110×250 мм, начинающихся на высоте около 600 мм от нижней части сушильной камеры. Каждые 6 вытяжных каналов верхней части сушилки соединены одним общим горизонтальным кирпичным каналом, имеющим посредине вытяжную шахту.

Для регулирования количеств подаваемого и отсасываемого воздуха на приточном канале и вытяжных шахтах устанавливаются шиберы.

Регулирование температуры воздуха производится путём изменения интенсивности горения топлива.

Для контроля температуры воздуха в сушилке устанавливаются с фасадной стороны 3 угловых термометра.

К недостаткам этой сушилки следует отнести большой расход металла на её сооружение и необходимость менять местами вручную в процессе сушки нижние и верхние кассеты.

Х. НАЛАЖИВАНИЕ, ИСПЫТАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Пусковой период

Новая сушильная установка по окончании монтажа всех её отдельных элементов и деталей вступает в пусковой период, во время которого производится:

1) проверка и изучение работы всех элементов сушильной установки, выявление могущих быть в них дефектов и неполадок и их устранение;

2) изучение и выявление эксплуатационного режима сушки, т. е. режима, при котором с наименьшими экономическими затратами (топлива, энергии, рабочей силы и пр.) получается небольшая производительность установки с выходом продукции хорошего качества (окончательно устанавливаются режим при приёмо-сдаточном испытании сушилки);

3) подготовка обслуживающего персонала и ознакомление его как с работой сушильной установки и её деталей, так и с режимом сушки.

При проверке и изучении работы сушильной установки и её отдельных элементов обращают внимание:

1) на герметичность сушильной камеры и её ограждений (стен, перекрытий);

2) на герметичность дверей, правильность и лёгкость их открытия и закрытия;

3) при газовых калориферах на их герметичность и отсутствие проникновения дымовых газов в воздушный тракт и, наоборот, воздуха в газовый тракт; при паровых калориферах на плотность соединений и закрытия паровых вентилей;

4) на герметичность всех воздухопроводов и газопроводов;

5) лёгкость входа вагонеток в камеру, прохождения по камере и выхода с сухим продуктом;

6) на нормальную работу вентиляционной установки (достаточное число оборотов вентилятора, отсутствие его нагревания, вибрации и пр.);

7) при наличии самостоятельной топки на её работу (правильный выход дыма, достаточность тяги).

Наивыгоднейший эксплуатационный режим устанавливается на основании расчётных данных, принятых при проектировании сушилки, путём подбора соответствующих параметров сушильного воздуха (начальной и конечной температуры и влажности, скорости).

Следует отметить, что в силу ряда условий, которые невозможно учесть точно и полностью при проектировании, действительный режим сушилки, как правило, всегда имеет в большей или меньшей степени отклонения от расчётного.

Например: фактически потери тепла (через ограждения сушильной камеры, при открывании и закрывании дверей) могут отличаться от принимаемых при расчётах. Равным образом могут отличаться от расчётных и фактические потери воздуха. Могут быть изменения при конструктивном оформлении деталей и отдельных элементов установки. Наконец, может быть отличная от принятой при расчёте характеристика сухимых ломтей хлеба (толщина ломтя, качество хлеба и т. д.). Всё вышеизложенное вызывает необходимость установления режима сушки новой установки с учётом местных условий, под влиянием которых он может значительно отличаться от запроектированного.

После окончания периода наладки установки, изучения режима сушки и обучения персонала по обслуживанию сушилки производятся приёмо-сдаточные испытания сушильной установки и её деталей.

Приёмо-сдаточные испытания

Приёмо-сдаточные испытания имеют своей целью:

- 1) выявить качество строительно-монтажных работ;
- 2) определить управляемость сушильной установки как с механической, так и с тепловой и технологической стороны;
- 3) установить окончательно наиболее выгодный эксплуатационный режим сушки;
- 4) определить производительность сушилки и продолжительность сушки;
- 5) определить качество получаемого сухаря, в частности равномерность его просушки в различных местах сушильной камеры;
- 6) определить расход сушильного воздуха, тепла, топлива, пара, электроэнергии на единицу (1 т) получаемого сухаря;
- 7) получить все необходимые данные для составления паспорта сушильной установки и всего цеха.

После приёмо-сдаточных испытаний сушильная установка сдаётся в эксплуатацию.

Эксплуатация сушильной установки сводится к обеспечению поддержания установленного режима сушки, устранению возникающих неполадок, своевременному производству планово-предупредительного и капитального ремонтов.

Для обеспечения установленного режима сушильная установка должна быть снабжена необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

Постоянный контроль режима сушки даёт возможность своевременно выявлять все отклонения от установленного режима и соответственно его регулировать, что в свою очередь избавляет производство от значительных потерь, которые при отступлении от нужного режима могут выражаться в снижении производительности установки, увеличении расхода топлива и энергии и в понижении качества продукта или даже браке его.

Во многих случаях отсутствие необходимых контрольно-измерительных приборов и постоянного контроля за работой сушилки ухудшает работу всего сушильного цеха.

Рассмотрим контрольно-измерительные приборы, применяемые в сушильных установках, и отдельные наблюдения и определения, производимые при испытании и эксплуатации сушилок.

Контрольно-измерительные приборы, применяемые в сушильных установках

Современная сушильная техника располагает значительным количеством контрольно-измерительной аппаратуры от простых ртутных термометров до сложных приборов, регистрирующих те или иные параметры и автоматически могущих изменять их в нужную сторону при помощи регулирующих устройств.

В сухарных сушилках сложные автоматические контрольные приборы широкого применения пока не получили, почему мы рассмотрим только простейшие приборы, необходимые в первую очередь.

Аппаратура, применяемая в сухарных сушилках, состоит из приборов для измерения и регулирования: а) температуры воздуха, б) влажности воздуха, в) скорости движения воздуха.

Кроме того при испытании сушилок и для периодических измерений применяются ещё приборы специального назначения:

- а) пирометры для определения высоких температур;
- б) газоанализаторы для определения состава газов;
- в) тягомеры для определения газовых и воздушных сопротивлений;
- г) тахометры для определения чисел оборотов вентиляторов.

Измерение и регулирование температуры воздуха

Температура воздуха в сушарных сушилках при эксплуатации обычно измеряется в месте входа его в сушилку и в месте выхода из сушилки. При испытании количество точек, в которых производятся замеры, увеличивается.

Приборами для измерения температуры воздуха служат термометры. В сушарных сушилках применяются обыкновенные ртутные термометры.

Термометры бывают прямые и угловые. Первые имеют хвостовую часть капиллярной трубки прямую, вторые изогнутую под углом в 90° . Длина хвостовой части доходит до 1 м. Угловые термометры служат для определения температур в пространстве, отделённом от наблюдателя вертикальной стенкой (как это часто имеет место в сушильной камере).

Изменение температуры воздуха может производиться или соответствующим регулированием процесса горения в топке (при огневых калориферах), или вращением вентиля, подающего пар в калорифер (при паровых калориферах), или, наконец, при помощи шиберов — заслонок, открывающих доступ холодного воздуха в калорифер.

Недостатки этого способа, как и вообще всех ручных способов регулирования, заключаются в том, что регулирование может производиться только периодически (а не постоянно) и всецело зависит от внимания, добросовестности и квалификации лица, обслуживающего установку.

Измерение и регулирование влажности воздуха

Для определения влажности воздуха применяются психрометры и гигрометры. В сушарных сушилках гигрометры не применяются, а из психрометров широкое распространение получил психрометр Августа. Описание прибора и принцип его работы был указан в главе «Явления, происходящие в процессе сушки сухаря».

Для работы в промышленных установках психрометры, как и термометры, во избежание их повреждений, помещаются в металлическую оправу.

Как указывалось, на показания психрометра оказывает влияние скорость движения воздуха. Разность показаний сухого и мокрого термометров в неподвижном воздухе получается меньше, чем в движущемся. Для введения поправки на скорость движения воздуха в приложениях приведён специальный график.

Влажность воздуха в сушильной установке регулируется изменением количества вводимого в сушилку свежего воздуха. С увеличением его подачи влажность воздуха уменьшается, наоборот с уменьшением подачи увеличивается. Регулирование подачи свежего воздуха производится в сушарных сушилках вручную с помощью шиберов и заслонок, установленных на воздуховодах.

Измерение, контроль и регулирование скорости воздуха

Скорость движения воздуха в сушильных установках определяется при помощи крыльчатых анемометров и манометрических трубок. Анемометры применяются при относительно небольших скоростях, при скоростях выше 5 м/сек применяются манометрические трубки и диафрагмы.

а) Крыльчатые анемометры. Принцип работы крыльчатых анемометров основан на превращении скоростного напора движущегося воздуха

во вращательное движение крыльчатого механизма (вертушки анемометра).

Наиболее распространённые крыльчатые анемометры: шаровые и пропеллерные (рис. 40).

При производстве замеров анемометр помещают в струю воздуха так, чтобы у пропеллерного анемометра ось вращения вертушки была параллельна направлению движения воздуха, а у шарового — перпендикулярна ему. Анемометры могут быть снабжены несколькими счётчиками оборотов с делениями, из которых первый показывает число оборотов вертушки до 100, второй — от 100 до 1 000, третий — от 1 000 до 10 000, и т. д. Числа оборотов счётчиков переведены на соответствующие скорости движения воздуха, отнесенные к продолжительности времени замера. Так как вертушка анемометра приоб-

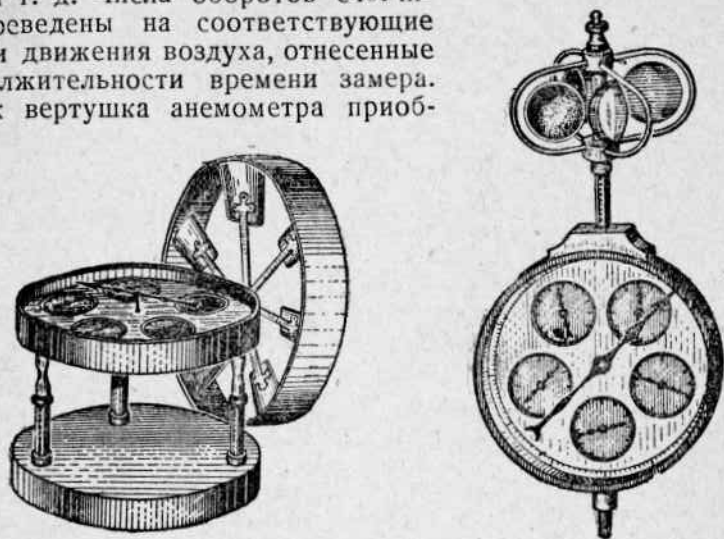


Рис. 40. Анемометры: а — пропеллерный, б — шаровой

ретает постоянную скорость вращения, соответствующую скорости движения воздуха, не сразу, а постепенно, то анемометры снабжаются специальным механизмом включения и выключения счётчиков.

Определение скорости движения воздуха производится следующим образом. Заметив показания счётчика анемометра до замера (или поставив его на ноль), вводят анемометр с выключенным счётчиком во время замера в канал, по которому движется воздух, скорость которого требуется определить. Необходимо, чтобы ось вертушки не отклонялась сильно от нужного направления потока воздуха, так как в противном случае возможны ошибки в показании анемометра. Через некоторое время (примерно через полминуты), когда вертушка приобретает постоянную скорость вращения, включают механизм счётчика, отметив время включения. В таком положении анемометр держат в канале от 1 до 3 минут, после чего счётчик выключают, отметив время выключения. Разность показаний счётчика после замера и до него (или если замер начался от нуля, то показание счётчика в конце замера) даёт в метрах длину пути воздуха, пройденного за время наблюдения. Разделённая на продолжительность замера в секундах, эта величина даёт значение скорости воздуха в метрах в секунду в замеренной точке канала. При производстве подсчёта необходимо учитывать поправочный коэффициент прибора, который даётся в прилагаемой к каждому прибору таблице. Так как скорость движения воздуха по сечению канала может быть различна, то для получения средней скорости по всему сечению необхо-

димо произвести замеры (определить скорость) в нескольких точках сечения и затем взять из них средние.

Крыльчатые пропеллерные анемометры дают достаточно точные для практических целей определения скорости движения воздуха в пределах от 0,5 до 10 м/сек, шаровые — до 20 м/сек.

Анемометры, во избежание засорения подшипников вращающегося механизма, следует хранить в закрытых футлярах.

б) Манометрические трубки. Для замера скоростей воздуха, превышающих 5 м/сек, применяются манометрические трубки Пито. Манометрические трубки определяют непосредственно величину скоростного напора по разности уровней жидкости в трубках.

Схема трубки ПИТО. В трубке (рис. 41) конструктивно объединены 2 капиллярных канала 1 и 2, сообщающиеся соответственно через отверстия 3 и 4 с воздухом пространства, в котором определяется скорость, причём устье отверстия 3 устанавливается против движения воздуха.

Манометрическая трубка, соединённая с противоположным концом

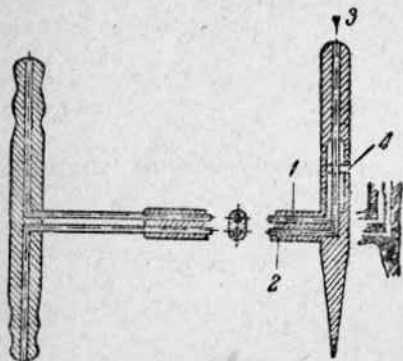


Рис. 41. Схема манометрической трубки

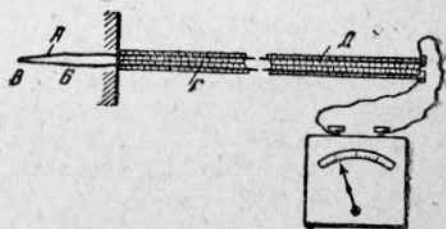


Рис. 42. Схема установки для измерения температуры с помощью термопары

капилляра 1, показывает общее давление H_0 , равное суммарному напору воздуха (статическому $H_{ст}$ и динамическому H_d).

$$H_0 = H_{ст} + H_d.$$

Отверстие 4, сообщающее капилляр 2 с окружающим воздухом, расположено таким образом, что манометрическая трубка, соединяющаяся с другим концом этого капилляра, показывает давление, равное статическому напору воздуха. Разность показаний между H_0 и $H_{ст}$ выражает скоростной (динамический) напор, по которому определяется скорость движения воздуха.

Прочие контрольно-измерительные приборы

Помимо перечисленных контрольно-измерительных приборов, применяющихся непосредственно при испытании сушильной установки и, в частности, сушильной камеры, при испытании пользуются различными приборами, из которых перечислим следующие:

а) термоэлектрические пирометры, или термопары для определения высоких температур, когда применение ртутных термометров невозможно.

Принцип действия термопар основан на возникновении электрического тока при нагревании места спая двух проводников, изготовленных из различных металлов, и сохранении низкой температуры на их противоположных концах (в другом месте спая).

На рис. 42 изображена схема термопары. Термопара состоит из двух тонких стержней (проволок) различного металла А и Б с надетыми на них фарфоровыми кольцами Г, изолирующими один стержень от дру-

гого; стержни заключены в защитную трубку Д. Один конец проводников А и Б имеет спай В. Этот конец термопары вставляется в канал, где нужно определить температуру (топка, газоход и пр.). Противоположный конец термопары соединяется с гальванометром. При нагревании конца спая термопары в ней возникает электродвижущая сила, пропорциональная температуре и отмечаемая гальванометром.

Газоанализаторы для определения состава топочных и дымовых газов. Описание действия этого прибора, основанного на химических реакциях, здесь не приводится. Получаемые этим прибором показания дают возможность регулировать работу топки (у сушилок с огневыми калориферами и самостоятельной топкой).

Тягомеры — приборы для определения разрежения в дымоходах, калорифере и пр.

Самым простым тягомером является стеклянная трубка, согнутая в виде U и снабжённая миллиметровой шкалой, по середине которой отмечена нулевая линия; в трубку до нулевой линии заливается вода. Один конец трубки соединяется с металлической заборной трубкой, вставленной в газоход, второй конец трубки остаётся открытым.

Под влиянием разности давлений между газоходом и окружающим воздухом вода в колене, соединённая с газоходом, при разрежении в нём поднимается, при увеличении давления опускается. По разности уровней воды от нулевой линии определяется давление или разрежение в дымоходе в мм вод. ст.

Недостатком приведённого тягомера является очень малая величина делений и в связи с этим возможные ошибки в отсчётах.

Более точным является тягомер Креля (рис. 43), в котором одно из колен трубки наклонно под углом таким образом, что разность давлений в 1 мм вод. ст. соответствует столбику жидкости в наклонённом ко-

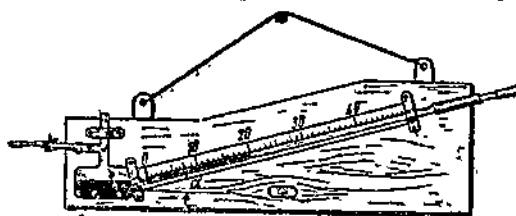


Рис. 43. Тягомер Креля

лене длиной 10 мм, т. е. точность показаний тягомера Креля по сравнению с простым U-образным тягомером увеличивается в 10 раз.

Над наклонной трубкой расположена шкала с делениями. В трубку наливается вода или спирт.

Наблюдение и измерения, производимые при испытаниях сушильной установки

Измерение скорости воздуха

Измерения скорости воздуха, производимые обычно анемометром периодически, через определённые промежутки времени за всё время испытания, позволяют вычислить объём циркулирующего через замеряемое сечение количества воздуха. Замеры скорости движения воздуха при входе в сушильную камеру и при выходе из неё позволяют определить количество входящего и выходящего воздуха из сушилки, а стало быть и имеющиеся потери его.

Измерение температуры и влажности воздуха

Измерения температуры и влажности воздуха, производимые во время испытания сушилок, позволяют выяснить следующие вопросы:

1) узнать распределение температуры и влажности воздуха во всей сушильной установке;

2) определить изменение состояния воздуха во время сушильного процесса;

3) определить состояние воздуха свежего входящего, циркулирующего в сушильной системе, и выходящего из сушилки, для составления балансов сухого воздуха, влаги и тепла.

Измерения производятся психрометрами, помещёнными в различных местах сушильной установки. Отчёты по психрометрам необходимо производить одновременно, чтобы получить действительную, соответствующую моменту замера картину распределения температуры и влажности воздуха по камере.

Наблюдение за сушимым продуктом — хлебом и сухарём

Качество готового сухаря является одним из основных показателей сушильной установки. Хороший сухарь должен иметь после просушки установленную влажность, не быть горелым и подожжённым, в сухаре не должно быть сквозных трещин.

Получение сухаря после выхода его из сушильной камеры с абсолютно одинаковой влажностью практически невозможно. В зависимости от типа, системы и конструкции сушильной камеры влажность сухаря (в зависимости от места нахождения его в сушильной камере во время процесса сушки) к концу процесса бывает различна.

В хороших сушилках эта разница незначительна и весь сухарь после сушки может считаться пригодным к передаче в упаковку; в менее совершенных сушилках колебания во влажности бывают настолько значительны, что сухарь после выхода из сушилки требует частичного дополнительного досушивания (в сушилках тоннельного типа) или перемещения его в сушильной камере во время процесса сушки (в камерных сушилках).

Во время испытания производится периодический отбор пробных образцов сухарей, взятых как по высоте, так и по ширине сушильной камеры (в тоннельных сушилках), а в камерных и шкафных сушилках — также и по глубине. На основе определения влажности отобранных пробных образцов сухарей представляется возможным дать оценку испытываемой сушилке в отношении равномерности производящейся в ней сушки. В ряде случаев путём соответственной укладки ломтей хлеба в кассеты, расположения кассет в сушилке, подбора режима и других мероприятий возможно уменьшить неравномерность сушки.

Для определения производительности сушилки за всё время испытания производится учёт количества сухарей (по весу) с разделением на стандартный и брак, горелый, лом и пр. Влажный сухарь, идущий на повторную досушку, учитывается особо. Оценка качества сухаря должна производиться опытным бракером.

Для определения количества влаги, испаряемой в сушилке, учитывается вес хлеба, поступающего в сушилку. Разница в весе между поступившим в сушилку хлебом и вышедшим из неё сухарём показывает количество испаряемой в камере влаги, что является, в сочетании с другими факторами (расходом тепла, воздуха), также показателем работы сушилки.

Определение расхода топлива, пара и электроэнергии при испытании сушилок

При испытании сушилок в отношении топлива, пара и электроэнергии производятся следующие замеры:

а) по топливу (в сушилках с огневым калорифером и самостоятельной топкой) — определяется по весу количество сжигаемого топлива;

б) по пару (в сушилках с паровым калорифером) — определяется 1) количество пара, поступающего в калорифер с указанием его характеристики (давления, влажности и пр.), 2) количество и температура конденсата при выходе из калорифера;

в) по электроэнергии — определяется её расхода за время сушки.

В результате произведённых замеров определяется средний расход топлива, пара и электроэнергии, отнесенный к единице времени (1 часу) или единице продукции (1 т сухаря).

Учёт операций, связанных с управлением сушилки

При испытании сушилки записываются все операции, связанные с процессом сушки. Регистрации подлежат:

1) в камерных сушилках время загрузки и разгрузки камеры, в сушилках тоннельного типа время загрузки и выгрузки каждой вагонетки с указанием порядкового номера;

2) при паровом калорифере время его включения и выключения с указанием степени открытия вентилялей;

3) время пуска и остановка вентиляторов;

4) изменение положения шиберов и заслонок, регулирующих впуск свежего и выпуск отработанного воздуха;

5) при сушилках с естественной циркуляцией наружная температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра и другие метеорологические явления;

6) все имеющиеся в процессе испытания ненормальности и неполадки, например перебои в подаче хлеба в сушилку, прекращение подачи пара в калорифер, выключение вентиляторов и пр.

Все перечисленные выше записи об операциях и неполадках дают возможность выявить их влияние на режим работы сушилки.

Паспорт сушильной установки и сухарного цеха

После пускового периода, налаживания и производства приёмного испытания при сдаче сушильной установки в постоянную эксплуатацию на установку и сушильный цех в целом составляется паспорт. Паспорт сушильной установки должен содержать основной материал, необходимый для планирования производства цеха.

Ниже даётся форма паспорта сушильного цеха, установленная ГЛАВХЛЕБ НКПП СССР.

ПАСПОРТ СУХАРНОГО ЦЕХА

I. Общие данные

1. Трест
2. Предприятие
3. Адрес предприятия
4. Дата ввода сушильного цеха в эксплуатацию
5. Расположен ли цех в здании завода или в отдельном помещении
6. Если цех расположен в отдельном здании, то его характеристика:
 - а) материал стен,
 - б) перекрытия,
 - в) материал пола,
 - г) освещённость.
7. Среднесуточная фактическая производительность цеха в т в сутки
8. Количество сушилок в цеху
9. Сметная стоимость сушильного цеха
10. Фактическая
11. Ёмкость склада для хлеба, идущего на сушку, в т
12. Длительность хранения хлеба перед сушкой, принятая на предприятии
13. Характеристика складских помещений для сухарей:
 - а) ёмкость в т,
 - б) деревянное, каменное
 - в) температура: летняя в °С, зимняя в °С,
 - г) влажность.

14. Характеристика оборудования для хранения сухарей:
 - а) тара: ящики, мешки,
 - б) тип штабеля: тройные, пятерные,
 - в) размер штабеля . . . , площадь, в м^2 , высота в м ,
 - г) проходы между штабелями,
 - д) применение стеллажей.

II. Характеристика сушилок

1. Тип сушилки (тоннельная, камерная, шкафная)
2. Количество тоннелей, камер, шкафов
3. Внутренние размеры каждой камеры, тоннеля, шкафа
 - а) длина , ширина . . . , высота м
4. Габариты сушилки по наружному обмеру:
 - а) площадь . . . в м^2 , б) высота . . . в м , в) объём . . . в м^3
5. Габаритная характеристика сушилки по наибольшему размеру:
 - а) длина, б) ширина, в) высота, г) площадь, занимаемая сушилкой, с учётом необходимой площади для обслуживания (сушильная камера, привод, топка и пр.), д) максимальное заглубление.

III. Тепловое устройство сушилки

1. Источники тепла для нагрева воздуха (специальная топка, отходящие от печей дымовые газы, пар и т. д.).

Примечание. При получении тепла путём использования отходящих от печей газов указать тип и количество печей.

2. При паровом обогреве: давление пара в атм и способ его получения (от специального котла, из общей котельной и т. д.).

3. Характеристика калорифера:

- а) огневой, паровой
- б) тип (трубчатый, пластинчатый, трубки Перкинса),
- в) поверхность нагрева в м^2 .

4. Обогревательное устройство внутри сушильной камеры:

- а) трубы: ребристые, гладкие, короба и пр.,
- б) непосредственный пуск горячего воздуха через каналы.

5. Направление движения воздуха в сушилке (относительно продукта):

- а) параллельный ток,
- б) противоток,
- в)

6. Применяется ли рециркуляция воздуха и в каком количестве.

7. Средняя скорость движения воздуха в сушилке в м/сек .

- а) по проекту
- б) фактическая

IV. Тепловой режим сушки

А. Параметры воздуха

Температура воздуха в $^{\circ}\text{C}$		Относительная влажность воздуха в %		Продолжительность сушки в часах
поступающего в сушилку	выходящего из сушилки	начальная	конечная	
По проекту				
Фактически				

Б. Качественные показатели готовой продукции:

- а) размер сухаря: длина, ширина, толщина . . (в мм)
- б) кислотность,
- в) набухаемость,
- г) влажность,
- д) процент сухаря с трещинами и их характеристика,
- е) процент брака и его характеристика (горелый, лом),
- ж) прочность сухаря (органолептически).

В. Применяется ли предварительная обжарка на печах. Если применяется, то на каком типе печей, температура обжарки, продолжительность обжарки, метод обжарки (на кассетах, листах . . .)

V. Производительность сушилки

1. Проектная *т/сутки*
2. Фактическая средняя
3. Максимально достигнутая

VI. Вентиляционное оборудование

А. Характеристика вентиляторов

№ вентилятора по порядку	Система вентилятора (Сирокко, ЦАГИ и др.)	Тип вентилятора (низкого, среднего давления)	Номер вентилятора по каталогу	Число оборотов вентилятора в минуту	Мощность мотора в <i>квт</i>	Число оборотов мотора в минуту	Примечание
1							
2							
3							

Б. Расход электроэнергии в *квт/час* на 1 *т* сухаря

VII. Подготовительное оборудование

1. Способ загрузки ломтей хлеба в сушилку (вагонетка, конвейер)
2. Тип вагонетки
3. Количество хлеба, загружаемого на вагонетку: а) кусков, б) килограммов
4. Тип кассет, их размер и материал
5. Количество кассет на одной вагонетке
6. Количество вагонеток, одновременно помещающихся в сушилку
7. Способ передвижения вагонеток в сушилке (лебёдкой, ручной)
8. Способ передвижения вагонеток в цеху: а) по рельсам, б) непосредственно по полу, в) ручной, г) механически.

VIII. Контрольно-измерительная аппаратура

1. Наличие термометров . . . шт.
2. . . психрометров . . .
3. Наличие анемометров . . .
4. Место установки контрольно-измерительных приборов (указать на чертеже сушилки в плане цеха).

IX. Хлеборезки

№ хлеборезки по порядку	Тип и марка	Привод ручной или от мотора	Мощность мотора в <i>квт</i>	Количество нарезаемых кусков в минуту	Производительность в <i>т/сутки</i>	Примечание

X. Дополнительные данные

1. Применяемое топливо и его марка
2. Расход условного топлива в *кг* на 1 *т* сухаря
3. Дефекты и достоинства сушильной камеры, хлеборезки, вагонеток, кассет

Приложение. Планы и разрезы сушильного цеха лист.
 Схемы и чертежи сушилок
 Чертежи вагонеток, кассет, хлеборезок
 Фотографии штук

Подписи директора, главного инженера и главного бухгалтера.
 Дата составления паспорта.

Чистка. Планово-предупредительный и капитальный ремонт сушильной установки

Эффективная и бесперебойная работа сухарных сушилок и продолжительность срока их службы во многом зависят от неуклонного наблюдения за их рабочим состоянием, от поддержания в чистоте тепло-воспринимающих и теплоотдающих поверхностей (калориферов) и своевременного производства необходимого ремонта. Каждый сухарный цех должен иметь разработанный график останова на ремонт и чистку отдельных сушильных агрегатов.

При непрерывной круглосуточной работе сухарных сушилок следует иметь в виду, что во время останова сушилки на чистку и ремонт в ней должны быть устранены все обнаруженные в работе дефекты и приняты меры к недопущению новых, так как иначе может произойти непредвиденная остановка агрегата, что нарушает нормальную работу цеха.

ГЛАВХЛЕБ НКПП СССР утверждены приведённые ниже нормативы останова сушилок на чистку, планово-предупредительный и капитальный ремонты (табл. 13).

Таблица 13

№ по порядку	Тип сушилки	Чистка и планово-предупредительный ремонт		Капитальный ремонт	
		время останова	продолжительность останова в часах	время останова	продолжительность останова в сутках
I	Тоннельные:				
1	ВНИИХ	ежемесячно	24—36	1 раз в два года	15—20
2	ГИПРОХЛЕБА	"	24—36	"	15—20
3	с огневым калорифером	"	12—24	"	15—20
4	ГИПРОХЛЕБА	"	12—24	"	15—20
5	с паровым калорифером	"	24—36	"	15—20
6	БГСЭ	"	36—48	"	15—20
II	Сушилка на отходящих газах печей	"	12—24	"	12
	Сушилка КС-2	"	12	"	5

Указанные нормативы являются ориентировочными и зависят во многом от рода потребляемого топлива, а также от местных условий.

Основные работы, которые должны быть проведены в период останова сушилок

Чистка. В сушилках с огневыми калориферами должны быть тщательно очищены от золы калориферы и дымоходы. Наличие золы на калориферах уменьшает теплопередачу от газов к нагреваемому воздуху и тем самым снижает производительность сушилки. Засорённость газоходов золой создаёт дополнительное сопротивление при прохождении газов.

При многозольном топливе и недостаточной очистке эта засорённость может доходить до того, что прекращает нормальную работу сушилки.

Ремонтные работы. 1) Устранение возможности проникновения газов в воздушный тракт и обратно, воздуха — в газовый тракт сушилки. Газы, попадающие в сушильную камеру, влияют на качество сухаря, а выходящие из сушильной камеры в цех затрудняют работу в цехе. При проникновении воздуха в газовый тракт может нарушаться нормальная работа топki;

2) устранение неплотностей в камере, воздуховодах и газоходах, во избежание излишней потери тепла;

3) проверка вагонеток, пути и достижение свободной проходимости вагонеток по камере (в тоннельных сушилках); несоблюдение этого условия влечёт значительные затруднения в обслуживании сушилки, нарушает режим сушки и вызывает неизбежное снижение производительности сушилки, а в ряде случаев — брак продукции;

4) приведение в порядок топки как в отношении футеровки, так и фронтных рам, загрузочных дверей, колосников и пр. Неисправности футеровки и гарнитуры влекут за собой нарушение нормального процесса горения топлива в топке;

5) обеспечение нормальной работы вентиляторов (устранение вибрации, нагрева подшипников и пр.).

Обслуживание сушилки во время эксплуатации

Подготовка сушилки к работе

После состоявшегося очередного останова на чистку и ремонт работа сушилки, как всякого станка, должна быть проверена на холостом ходу, во время которого проверяется достигнутая герметичность всех мест сушильной установки, лёгкость закрытия дверей, лёгкость прохождения вагонеток по камере, нормальная работа вентиляторов.

Во время эксплуатации сушилка должна быть обеспечена необходимыми контрольно-измерительными приборами (термометрами и психрометрами, тягомерами).

Все приборы должны находиться в исправном состоянии и установлены таким образом, чтобы на них легко можно было видеть показания. Психрометры должны иметь чистые фитили и резервуары, постоянно заполненные водой.

Управление сушилкой во время работы

Основная задача при управлении сушилкой в процессе сушки — поддержание в камере заданной температуры и влажности воздуха.

Необходимое состояние воздуха (заданная температура и влажность) должно быть получено наиболее экономичным путём, т. е. с наименьшим расходом тепла (топлива или пара) и электроэнергии. Поэтому, например, невыгодно весь отработанный воздух из сушилки выбрасывать наружу, а вместо него забирать полностью свежий (холодный); целесообразнее выкидывать наружу только часть отработанного (тёплого) воздуха, а часть использовать обратно на сушку, добавив к нему свежего воздуха, так как расход тепла на нагрев смеси отработанного воздуха со свежим будет меньше.

Регулирование количества подаваемого тепла на нагрев воздуха производится:

а) при паровом калорифере регулированием подачи пара в калорифер путём прикрытия или открытия вентиля;

б) при огневом калорифере регулированием температуры газов, подаваемых в калорифер, что достигается или изменением количества свежего воздуха, подаваемого в смесительную камеру к дымовым газам, или уменьшением количества сжигаемого топлива в топке.

Заданная влажность воздуха поддерживается регулированием шиберов для впуска свежего воздуха и выпуска отработанного.

Необходимо иметь в виду, что изменение при помощи регулировки одного параметра воздуха, например температуры, сказывается на другом — на относительной влажности воздуха.

Наблюдение за сухими ломтями и готовым сухарём

Для обеспечения нормального качества сухаря чрезвычайно важно качество подготовленных к сушке ломтей хлеба.

Необходимо, чтобы ломти хлеба, подлежащие сушке, были однородны по толщине. Если это условие нельзя выполнить, то следует разнообразность материала в отношении сушки уменьшать всеми возможными способами, в частности путём соответствующей укладки ломтей в кассеты и в сушильную камеру. Известно, что горбушки, имеющие боковую корку, сушатся дольше, чем такой же толщины ломти хлеба, вырезанные из средней его части; тонкие ломти хлеба высушиваются быстрее толстых, в то же время практически не существует сушилок, создающих по всему сечению камеры абсолютно одинаковые условия для сушки, поэтому горбушки и толстые ломти хлеба следует помещать в те места камеры, где сушка идёт интенсивнее. Наоборот, где сушка идёт медленнее, целесообразно помещать более тонкие ломти. Необходимо следить за исправным состоянием кассет и укладкой на них ломтей: ломти должны быть распределены равномерно по всей кассете, не соприкасаться друг с другом.

Хорошее состояние сушильной камеры, как и правильная укладка ломтей является одним из обязательных условий получения хороших результатов сушки.

Укладка ломтей в значительной степени влияет на качество их сушки и общую производительность сушильной камеры, поэтому она должна быть приспособлена к типу и системе сушилки.

Укладка кассет с ломтями на вагонетки и закатывание вагонеток в камеры должны производиться плавно и без толчков, во избежание смещения ломтей в кассетах.

Должно производиться наблюдение за изменением влажности сухих ломтей и их внешним видом.

Сухарь считается готовым, когда имеющаяся в нём влажность не превышает установленной нормы. Определение окончания процесса сушки и готовности сухаря является ответственной задачей и во время эксплуатации должна производиться опытными работниками.

Выпуск сухаря с пониженной против нормы влажностью невыгоден с точки зрения экономики цеха, сухарь же с повышенной влажностью подвергается порче (плесневению) при хранении.

Продолжительность сушки сухаря колеблется в широких пределах от 4 до 24 часов и выше и зависит от типа сушилки и принятого режима. (О длительности сушки и факторах, оказывающих на нее влияние, см. главу VII).

Производственный журнал сушильного цеха

При эксплуатации сушилки цех ведёт производственный журнал, в который заносятся все основные показатели, связанные с процессом сушки.

Правильное систематическое и аккуратное ведение журнала имеет большое практическое значение, так как не только характеризует работу цеха и отдельных смен, но даёт возможность выбирать и устанавливать наиболее рентабельные режимы сушки.

Записи не должны быть сложными и громоздкими ни по форме, ни по количеству, чтобы, не отнимая значительного времени у персонала, его составляющего, давали в то же время полную картину работы сушилки.

Журнал необходимо вести отдельно на каждую сушильную камеру.

XI. СУШКА СУХАРЕЙ В ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ПЕЧАХ, С ОБЖАРКОЙ В ПЕЧАХ И ДОСУШКОЙ В СУШИЛКАХ

Для сушки сухарей могут быть использованы и хлебопекарные печи любого типа и конструкции.

Сушка сухарей в печах непрерывного действия

Ломти хлеба сушат непосредственно на поду либо на листах, либо в кассетах. При сушке непосредственно на поду или на листах ломти хлеба примерно в середине процесса сушки должны быть перевернуты, — иначе просушка и окраска сухарей с разных сторон будут неравномерными. Переворачивание на листах можно производить очень быстро: для этого вынимают из печи лист с ломтиками, накрывают его другим листом и переворачивают. После этого все ломти оказываются на втором листе в перевернутом виде. Перевернутые сухари снова сажают в печь для сушки. Дверцы и душники (вытяжные клапаны) пекарной камеры во время сушки сухарей должны быть слегка приоткрыты для отвода из пекарной камеры влажного воздуха.

Температура пекарной камеры является основным фактором, определяющим длительность сушки сухарей в печах. В зависимости от тепловых и конструктивных особенностей печи, способа и плотности загрузки её сушимым продуктом для сушки сухарей может применяться температура пекарной камеры от 120° и выше.

Применяться должна наибольшая температура, не вызывающая подгорания сушеного продукта.

При указанных выше температурах сушка сухарей в печах длится обычно от 4 до 6 часов.

Производительность хлебопекарной печи при сушке сухарей сравнительно невелика. Опыты по сушке сухарей в печи со стационарным подом при 120°, проведенные нами в 1942 г., показали, что часовая производительность 1 квадратного метра пода была равна (в кг):

при сушке непосредственно на поду	— 1,9
" " на листах	— 1,7
" " в кассетах с вертикальной укладкой в них ломтей	— 2,0

Ввиду столь невысокой производительности печей при сушке в них сухарей целесообразно устройство для этой цели хотя бы простейших сушилок.

Сушка сухарей в жаровых печах

Сушка сухарей в жаровых печах, пекарная камера которых периодически является топочной камерой, отличается переменным температурным режимом. Сразу после топки и выстойки температура в пекарной камере доходит до 280—300°, постепенно снижаясь в процессе работы на обжарке или сушке сухарей до 100—120° и более низкой температуры.

Исходя из такого режима температуры в пекарной камере жаровой печи, наиболее целесообразным является использование печи после её топки и выстойки сперва для обжарки сухарей (на листах или на поду) и лишь после падения температуры до 120—150° — для досушки обжаренных сухарей (на поду или в кассетах). Досушка может производиться, пока температура не упадёт до 60—80°.

При этом за 10—12 часов между двумя топками печи удаётся сделать 2—3 оборота пода — на обжарке и 1—2 оборота — на досушке. При обжарке и досушке на поду или на листах средняя часовая произ-

водительность печи (с учётом времени на топку и выстойку) равна 0,5—0,6 кг.

При обжарке на листах и досушке в кассетах эта цифра может быть доведена до 1—1,2 кг.

При обжарке и досушке сухарей непосредственно на поду особое внимание должно быть уделено равномерному прогреву пода при топке и тщательной зачистке пода после топки, во избежание загрязнения сухарей.

Сушка сухарей с обжаркой в хлебопекарных печах и досушкой в сушилках или в помещениях с соответствующей температурой

В тех случаях, когда сушка сухарей производится в сушилках или помещениях с невысокой температурой (40—80°) сушильного воздуха в целях ускорения сушки сухарей и улучшения их качества (уменьшение количества потрескавшихся и покоробившихся сухарей) целесообразна предварительная кратковременная обжарка ломтей хлеба в хлебопекарных печах.

Для этого ломти хлеба на поду, или на листах, или на кассетах подвергаются в пекарной камере печи воздействию температуры порядка 240—280° в течение 30—45 мин. За это время ломти хлеба прогреваются, теряют часть влаги и покрываются буроватоокрашенной зарумяненной корочкой, предохраняющей сухари от растрескивания и деформации при дальнейшей их досушке.

Досушка обжаренных ломтей хлеба производится либо в сушилках с невысокой температурой (40—80°) сушильного воздуха, либо в помещениях (надпечных пространствах и т. п.) с температурой воздуха выше хотя бы 40°.

ХII. ОТБРАКОВКА, УПАКОВКА, КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ХРАНЕНИЕ СУХАРЕЙ

Охлаждение и отбраковка сухарей

Готовые сухари после выхода из сушилки необходимо охладить до температуры помещения и только после этого упаковывать.

До упаковки или, точнее говоря, в процессе самой упаковки отбраковывают сухари, не соответствующие в части внешнего вида, формы и размеров требованиям ГОСТ 686-41 на сухари простые.

Оценка сухарей по вкусу и запаху, влажности, кислотности и намокаемости производится лабораторией по образцам, отбираемым согласно разделу VIII ГОСТ 686-41.

В процессе укладки отбраковывают сухари горелые, с крупными сквозными трещинками, с шириной просвета более 2 мм и протяжением более половины ширины сухаря, с посторонними включениями, загрязнённые, а также сухари, нестандартные по размерам. Учитывается при этом и количество крупного и мелкого лома, допускаемого стандартом.

Одновременно с этим отбраковывают сухари непросушенные. Непросушенность сухарей в процессе отбраковки определяется органолептически потому, что сухарь с прослойкой в центре непросохшего мякиша способен сжиматься при сдавлении его пальцами и издаёт при постукивании сухаря о сухарь глухой звук.

Отбраковывать, однако, по звуку все сухари нет основания, иначе пришлось бы исключить значительное количество сухарей, имеющих

влажность 8—12%. Поэтому органолептической отбраковке подлежат лишь сухари с явно проявляющейся при сжатии непросушенной прослойкой мякиша в центре.

Следует иметь в виду, что тонкие прослойки непросохшего мякиша в центре сухаря при последующем хранении его, вследствие выравнивания влажности, исчезают.

Упаковка сухарей

Для упаковки и отбраковки сухари рассыпают на упаковочном столе и укладывают их в чистые, без постороннего запаха и не зараженные амбарными вредителями, бумажные многослойные крафтмешки.

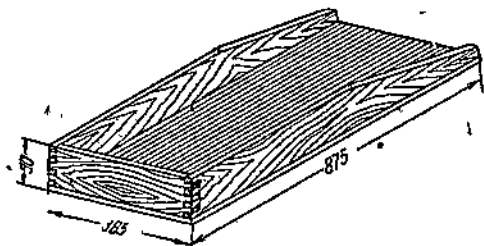


Рис. 44. Лоток для упаковки сухарей в крафтмешки

Допускается в отдельные периоды и по специальным разрешениям производить упаковку сухарей в льняные мешки, чистые и не зараженные амбарными вредителями.

Для облегчения укладки сухарей в крафтмешки обычно употребляют лотки наподобие изображенного на рис. 44.

Сухари правильными плотными рядами укладывают на таком лотке и потом сразу вдвигают их в крафтмешок.

Зашивка мешков должна быть тщательной.

Внутри каждого мешка закладывается ярлычок с номером упаковщика. Каждый мешок маркируют специальным штампом, на котором четко обозначаются наименование и местонахождение предприятия, наименование сухарей, вес нетто, дата изготовления, № ГОСТ, партии и весовщика.

Хранение сухарей должно производиться в условиях, исключающих заражение их амбарными вредителями (клещами, хлебным точильщиком и др.).¹

Качественная оценка сухарей

В основу качественной оценки сухарей положены требования, предъявляемые к этому продукту Государственным общесоюзным стандартом (ГОСТ) на сухари простые.

ГОСТ 686-41 на сухари простые, действующий с 1 июля 1941 г., в зависимости от сорта муки, подразделяет сухари на следующие сорта:

1. Сухари ржаные из ржаной обойной муки, сокращенное обозначение «сухари ржаные ОБ».

2. Сухари пшеничные из пшеничной обойной муки, сокращенное обозначение «сухари пшеничные ОБ».

3. Сухари ржано-пшеничные из смеси: ржаной обойной муки в количестве 70% и пшеничной обойной муки 30%, сокращенное обозначение «сухари ржано-пшеничные».

4. Сухари ржаные из смеси: ржаной муки 70% и ржаной обдирной муки 30%, сокращенное обозначение «сухари ржаные ОБ-ОБД».

¹ О мероприятиях по борьбе с этими вредителями см. специальную брошюру Родионова З. С., Руководство по борьбе с амбарными вредителями на хлебопекарных предприятиях.

В соотношениях сортов муки допускаются отклонения в пределах 5%.

ГОСТ 686-41 предусматривает также требования к качеству хлеба, из которого готовятся сухари.

Хлеб ржаной для ржаных сухарей ОБ должен соответствовать требованиям ОСТ-5107, а хлеб пшеничный для пшеничных сухарей ОБ — требованиям ОСТ-5139.

Ржано-пшеничный хлеб для сухарей ржано-пшеничных и хлеб для сухарей ржаных ОБ-ОБД должен соответствовать требованиям ОСТ-5107; последний не предусматривает норм влажности, кислотности и пористости, которые должны быть следующими: влажность мякиша — не более 50%, кислотность мякиша — не более 11°, пористость ржано-пшеничного хлеба — не менее 48%, пористость хлеба для сухарей ржаных ОБ-ОБД — не менее 45%.

Вес штуки хлеба допускается до 4 кг.

По внешнему виду сухари должны быть неподгорелые, без крупных сквозных трещин (т. е. трещин с шириной просвета более 2 мм и протяжением более половины ширины сухаря), без посторонних включений, без признаков плесени.

Вкус и запах должны быть свойственны сухарю (без порчи и затхлости).

Форма и размер сухаря также обусловлены ГОСТ 686-41.

Сухари из формового хлеба могут быть в виде целых ломтей, ломтей, разрезанных пополам, и горбушек; сухари из подового хлеба — в виде ломтей, шириной не менее 5 см, и горбушек.

Толщина сухарей по корке — от 2 до 2,5 см. Толщина сухарей из горбушек формового хлеба допускается в пределах 1,5—2,5 см, а горбушек подового хлеба — до 3,5 см.

При отпуске или отгрузке со склада затаренные сухари должны состоять не менее чем на 90% (по весу) из целых сухарей. В остальном количестве допускается: крупного лома, не проходящего сквозь сито с размером ячеек 40×40 мм, не более 7% и мелкого лома, проходящего сквозь такое сито, а также крошки — не более 3%.

Количество горбушек по отношению к общему числу сухарей не должно превышать 20%.

Присутствие хлебных вредителей в сухарях не допускается.

Влажность сухарей при отпуске или отгрузке со склада производства, в соответствии с дополнительными к ГОСТ указаниями, не должна превышать 12%.

Кислотность в пересчёте на сухое вещество сухарей допускается:

ржаных ОБ — не более 21°,
пшеничных ОБ — не более 13°,
ржано-пшеничных ОБ
и ржаных ОБ-ОБД — не более 20°.

Требуется полная и равномерная намокаемость сухарей: для сухарей из формового хлеба — в течение 5 мин., для сухарей из подового хлеба — в течение 8 мин. При разжевывании намокшего сухаря может ощущаться свойственный ему лёгкий хруст.

Порядок отбора образцов сухарей для качественной оценки и правила приёмы сухарей также детально регламентируют ГОСТ 686-41.

Качество сухарей в части соответствия техническим условиям ГОСТ определяется предприятием-изготовителем на выработку каждой смеси.

Максимальный вес выработки, характеризуемый одним анализом, установлен в 8 т.

Результаты качественной оценки сухарей фиксируют в пронумерованных, прошнурованных и опечатанных журналах, являющихся основными документами по качеству этой продукции.

Партия сухарей, отгружаемая со склада производства, сопровождается сертификатом, выдаваемым инспекцией по качеству или, при отсутствии стационарного инспекторского пункта, качественным удостоверением, выдаваемым производством.

Количественно под партией понимают не более одного вагона сухарей (независимо от их наименования), предназначенных к единовременной отправке в один адрес.

В сертификате или качественном удостоверении, кроме общего заключения о соответствии качества сухарей требованиям ГОСТ, проставляют цифровые данные по влажности, кислотности, количеству лома и горбушек.

Оценку качества одноименных сухарей, исключая определение количества лома и горбушек, производят по среднему образцу, отбираемому в количестве трёх штук сухарей от:

каждого 20-го мешка, если выработка или партия не превышает 2 т									
" 30-го	"	"	"	"	"	"	"	"	4 "
" 40-го	"	"	"	"	"	"	"	"	8 "

Процент лома и горбушек устанавливают в момент выдачи сертификата или качественного удостоверения путём вскрытия не более 2 мешков от каждой тонны сухарей.

Для физико-химического анализа отбирают 3—4 сухаря из среднего образца и немедленно передают их в лабораторию с указанием веса выработки или партии, даты отбора образца и за подписью лица, отобравшего образец. При отборе образца на производстве указывают также номер смены и дату выработки, при отборе на складе — номер партии.

В случае доставки образцов в лабораторию, находящуюся вне помещения производства или склада, их тщательно упаковывают в два слоя чистой бумаги, причём внутренний слой должен состоять из целлофана, пергамента или парафиновой бумаги.

Анализ образца производится не позднее 3 суток с момента его отбора.

Склады, на которые отправляются сухари, принимают их на основании данных сертификата или качественного удостоверения.

В спорных случаях производят проверку продукции в присутствии представителей поставщика и инспекции по качеству, вскрывая для этого до 5% мешков от партии, но не менее 10 мешков. Сухари каждого вскрываемого мешка проверяют по показателям: вкуса, запаха, внешнего вида, количества горбушек и наличия хлебных вредителей. Количество лома не проверяется.

Результаты проверки оформляют актом с указанием качественных показателей сухарей каждого вскрываемого мешка.

Средний образец для определения физико-химических показателей составляют путём отбора одного сухаря от каждого вскрытого мешка.

Вскрытие мешков для проверки качества продукции и вторичное затаривание сухарей должно проводиться в условиях, исключающих возможность загрязнения и заражения их хлебными вредителями.

Методы испытания качества сухарей

• Определение внешнего вида. Каждый сухарь из среднего образца осматривают по всей поверхности, устанавливая соответствие требованиям ГОСТ.

Промеры трещин и уплотнённых участков производят линейкой с миллиметровыми делениями. Протяжение криволинейных трещин определяют расстоянием прямой между концами трещин.

Определение вкуса и запаха производят органолептически: определение горечи, вследствие карамелизации сухаря, производят в мелкой, тщательно перемешанной сахарной крошке, полученной путём измельчения целого сухаря.

Определение размеров сухаря. Ширину сухаря из подового хлеба определяют замером по нижней корке, толщину — замером по корке.

Толщину сухарей из горбушек формового хлеба определяют как среднее арифметическое из размеров верхней и нижней корок; из горбушек подового хлеба — по нижней корке. Все эти замеры производят линейкой с миллиметровыми делениями.

Определение количества лома и горбушек. Содержимое мешка осторожно высыпают на проволочное сито с ячейками размером 40×40 . Целые сухари и горбушки отбирают, горбушки при этом подсчитывают. Куски сухарей, прошедшие через сито (мелкий лом) и оставшиеся на сите (крупный лом), взвешивают порознь.

Количество лома в процентах (x) вычисляют по формуле:

$$x = \frac{b \cdot 100}{a},$$

где: a — вес сухарей в мешке (в кг),
 b — вес лома (в кг).

Определение заражённости хлебными вредителями. Содержимое мешка высыпают на лист чистой светлой бумаги или на клеёнку. Отбирают целые сухари и лом. Оставшуюся сахарную пыль и крошку рассматривают в лупу (при увеличении в 5—6 раз).

Тару из-под сухарей тщательно вытряхивают на отдельный лист бумаги или на клеёнку и полученную сахарную пыль и крошку рассматривают в лупу при этом же увеличении.

Определение намокаемости. ГОСТ 686-41 предусматривает следующий порядок определения намокаемости сухаря. Половину сухаря спускают в стакан с водой комнатной температуры $15-20^\circ$. По истечении 5 мин. для сухаря из формового хлеба и 8 мин. для сухаря из подового хлеба сухарь должен размокнуть настолько, чтобы легко разжевываться.

Субъективность такого определения намокаемости сухарей очевидна. Автором совместно с В. А. Лукьяновым для специальных исследовательских целей был предложен, сконструирован и испытан прибор АЛ-2 для объективного определения намокаемости сухарей.

Вторая, усовершенствованная, модель этого прибора — АЛ-2 — изображена на рис. 45, а и состоит из следующих основных деталей: плиты 1, стеклянной ванночки 2, стойки 3, кронштейна 4 с зажимным устройством 5 и пластиной 6, в отверстиях которой закреплены втулки-обоймы 7, и пяти вертикально установленных стержней 8. Эти стержни пропущены сквозь втулки-обоймы 7 и имеют утолщённую цилиндрическую часть 9, ввёртнутые цилиндрические стерженьки 10 со сферически округлыми концами и ввёртнутые головки 11.

Для проверки положения прибора на плите 1 установлен уровень 12.

Определение намокаемости сухаря на этом приборе сводится к следующему: исследуемый сухарь помещают в ванночку, на дне которой находится слой резиновой губки толщиной 1,5 см.

Ванночку устанавливают на плите прибора так, чтобы сухарь оказался центрально расположенным по отношению к стерженькам 10, находящимся в это время в крайнем верхнем положении; вращением на соответствующий угол головок 11 стерженьки приводят в положение, при котором они свободно опускаются вниз, упираясь концами в по-

верхность сухаря. Давление, производимое каждым стерженьком, равно 750 г (суммарному весу деталей 8, 9, 10 и 11).

Затем в ванночку наливают воду необходимой температуры и включают секундомер; с этого момента начинается процесс намокания. По мере намокания сухарь все менее и менее способен выдерживать давление, оказываемое на него, стерженьками 10, в момент же полного намокания массы сухаря стерженьки быстро проходят сквозь неё, как бы протыкая сухарь.

Этот момент фиксируется по показанию секундомера отдельно для каждого стерженька.

Таким образом, для пяти точек исследуемого сухаря получают цифровые значения показателя намокаемости.

Расположение стерженьков в горизонтальной плоскости (в плоскости поверхности сухаря), показанное на рис. 45, б позволяет определить либо намокаемость целого ржаного сухаря в пяти его точках, либо намокаемость двух половинок ржаного сухаря одновременно в двух точках каждой половинки.

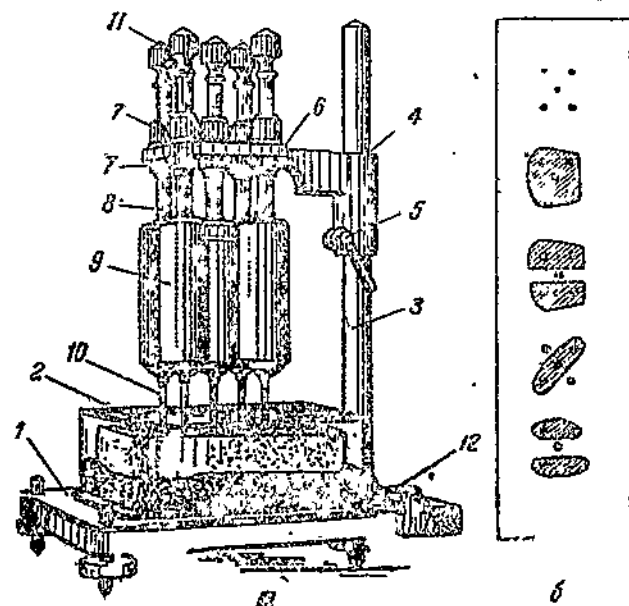


Рис. 45. Определение намокаемости сухарей:
а—прибор, б—схема расположения в ванне сухарей разной формы и размеров

Намокаемость пшеничного сдобного сухаря, в зависимости от его формы и размеров, может определяться по намокаемости целого сухаря одновременно в двух или трёх его точках.

Прибор АЛ-2 применяется в настоящее время в лаборатории кафедры технологии хлебопечения для объективной характеристики намокаемости сухарей, получаемых при разных режимах сушки.

Подготовка пробы для определения влажности и кислотности сухарей

Половинки двух-трёх сухарей быстро измельчают в ступке или лабораторной дробилке до такой степени, чтобы вся проба проходила через металлическое сито № 24. Измельчённую и тщательно перемешанную массу до анализа хранят в стеклянной банке с плотно пригнанной пробкой.

Определение влажности сухарей. В чистой, предварительно высушенной и взвешенной бюксе, диаметром 3,5—4,5 см и высотой 1,6—2,0 см, отвешивают с точностью до 0,01 г около 5 г измельчённого сухаря. Открытые бюксы вместе с крошками помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до 145°. Нагрев регулируют таким образом, чтобы в шкафу в продолжение 10 мин. установилась температура 130°. Отметив этот момент, сушат навеску в течение 40 мин. Колебания температуры допускаются ± 2 .

По окончании высушивания и охлаждения в эксикаторе, бюксы с навесками взвешивают с точностью до 0,01 кг.

Содержание влаги (W) в процентах вычисляют по формуле:

$$W = \frac{(a - b) \cdot 100}{a} \quad (65)$$

где: a — навеска сухарей до высушивания (в г),
 b — навеска сухарей после высушивания (в г).

Определение влажности ведут параллельно в двух навесках и конечный результат выражают как среднее арифметическое из двух определений. Расхождения между результатами параллельных анализов допускаются не более 0,5%.

Определение кислотности сухарей. Сухарный порошок в количестве 10 г взвешивают с точностью до 0,01 г, помещают в стеклянный сосуд ёмкостью 200—300 мл с хорошо пригнанной пробкой, заливают 100 мл дистиллированной воды комнатной температуры и закрывают пробкой.

После десятиминутного настаивания при комнатной температуре содержимое сосуда интенсивно взбалтывают в течение 3 минут (на болтушке Вагнера или вручную), дают ему отстояться в течение 10 мин. и фильтруют через сухую вату или декантируют в сухой стаканчик. Из стаканчика отбирают пипеткой 25 мл в колбу Эрленмейера ёмкостью 150—200 мл, прибавляют 5 капель 1%-ного раствора фенолфталеина и титруют 0,1 N раствором щёлочи до заметного розового окрашивания.

Кислотность выражают в градусах на 100 г сухого вещества.

Определение кислотности ведут параллельно в двух навесках и конечный результат выражают как среднее арифметическое из двух определений. Кислотность (Z) в градусах вычисляют по формуле:

$$Z = \frac{K \cdot V \cdot 400}{100 - W} ,$$

где: V — количество 0,1 N раствора щёлочи, израсходованное на титрование (в мл)
 K — поправочный коэффициент для пересчёта на 0,1 N раствор щёлочи,
 W — влажность сухарей (в %).

Расхождения между результатами параллельных титрований допускаются не более 1° для ржанных и ржано-пшеничных сухарей; для пшеничных сухарей — не более 0,5°.

Значения влажности и кислотности вычисляют с точностью до 0,5% и 0,5°, причём доли до 0,25 включительно отбрасывают, доли свыше 0,25 и до 0,75 включительно приравнивают к 0,5; доли свыше 0,75 приравнивают к единице.

Хранение сухарей

Сухари должны храниться в изолированных помещениях, чистых, хорошо проветриваемых и не зараженных амбарными вредителями.

Не допускается хранение сухарей вместе с мукой, крошкой, сметками и другими продуктами или материалами, могущими послужить источником заражения сухарей или понижения их качества. Крафтмешки с сухарями должны храниться на подтоварниках или стеллажах, штабелями не выше чем в 15 рядов.

Перед отправкой сухарей со склада предприятия каждый мешок необходимо повторно взвешивать, так как вес сухарей, пересушиваемых до влажности в 6—8%, за время хранения может увеличиться вследствие постепенного приближения их влажности к равновесной.

ХИ. СУХАРНЫЙ ЦЕХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 16 т. СУХАРЕЙ В СУТКИ

В настоящем разделе приведены данные по типовому сухарному цеху производительностью 16 т в сутки, запроектированному ГИПРО-ХЛЕБ.

Типовой проект предусматривает расположение цеха на территории хлебозавода (или другого действующего пищевого предприятия), что в подавляющем большинстве случаев имеет место в действительности.

Исходя из этого, принимается, что цех пользуется водой, теплом (для отопления помещений) и электроэнергией от существующего хлебозавода. Из непроизводственных помещений в цехе предусматривается устройство только санпропускников, гардеробной и уборных; все остальные помещения, в том числе и конторские, являются общими с хлебо-заводом.

Для цеха отводится отдельное здание, но он может быть расположен и в пристройке к хлебозаводу, а также и в помещении завода, если там имеется достаточно свободных площадей, позволяющих разместить цех с обеспечением основной схемы его производственного потока. В последних двух случаях все непроизводственные помещения могут быть общими с хлебозаводом.

Описание сухарного цеха

Сухарный цех (рис. 46), расположенный в одноэтажном кирпичном здании, состоит из 1) хлебохранилища, 2) отделения резки и укладки ломтей хлеба в кассеты и на вагонетки, 3) сушильного отделения с двумя тоннельными сушилками конструкции ФТЛ-ВНИИХ, 4) упаковочного отделения, 5) склада готовой продукции и 6) санузла с гардеробной и уборной. Общая кубатура цеха — 3500 м³.

Производственный поток цеха

Поступивший в хлебохранилище хлеб хранится на обычных семиполочных этажерках, применяемых на хлебозаводах.

Из хлебохранилища хлеб подаётся к резальным машинам. Нарезаемые ломти хлеба падают в ящики, расположенные у машин; специальные работницы подносят эти ящики с ломтями к раскладочным столам.

На каждое рабочее место для раскладки отводится 1 пог. м стола из расчёта, что 0,5 м занимает ящик с ломтями хлеба и 0,5 м — кассета.

Работница раскладывает ломти в кассеты и устанавливает последние на вагонетки.

Нагруженные вагонетки с хлебом отвозят в сушильное отделение и периодически подают в тоннели сушильной камеры, где производится сушка.

Вагонетка с готовым сухарём выходит с противоположного загрузке конца тоннеля.

В каждом тоннеле-камере постоянно находится 5 вагонеток.

Передвижение вагонеток производится либо вручную, либо от мотора.

Высушенные сухари остывают в кассетах на вагонетках. После остывания сухари подаются к упаковочным столам.

Упаковка ведётся на столах в бумажные или джутовые мешки, и укладка сухарей в них производится либо непосредственно, либо при помощи деревянных лотков. На каждое рабочее место для упаковки отводится 1 пог. м стола: слева на столе у работницы находится кассета с сухарями, справа — мешок для упаковки.

Пустые кассеты со стола снова загружают на сушильную вагонетку и отвозят в раскладочное отделение к резальным машинам.

Мешки с сухарями после упаковки взвешивают до установленного стандартного веса, затем зашивают, маркируют и отправляют в склад готовой продукции.

Мешки с сухарями укладывают на складе тройками. В плане размер тройка (для бумажных мешков): $0,8 \times 1,2$ м. По высоте укладывают 14 мешков штабелями; таких штабелей можно уложить в складе 38.

Количество сухарей, могущих одновременно находиться на складе, составляет $10 \times 3 \times 14 \times 38 = 16$ т, т. е. ёмкость склада рассчитана на суточное хранение готовой продукции.

Ориентировочный штат цеха

Таблица 14

№ п/п	Наименование квалификации	Количество			
		1-я смена	2-я смена	3-я смена	Всего
1	Приёмщик хлеба	1	1	1	4
2	Рабочий хлебохранилища	1	1	1	4
3	Рабочий по обслуживанию резальных машин	2	2	2	8
4	Раскладчицы	7	7	7	28
5	Рабочий по транспортировке вагонеток и по подаче хлеба от резальных машин к раскладочным столам	1	1	1	4
6	Сушильщик	1	1	1	4
7	Начальник цеха, он же заведующий готовой продукцией	—	1	—	1
8	Рабочий по складу готовой продукции	—	1	—	1
9	Упаковщица	7	7	7	28
10	Рабочий пропускника	1	1	1	4
11	Уборщица по цеху	1	1	1	4
12	Истопник	1	1	1	4
13	Слесарь	1	1	1	4
14	Приёмщик готовой продукции	1	1	1	4
15	Рабочий по зашивке мешков	1	1	1	4
Итого		26	28	26	106

Оборудование цеха

Таблица 15^а

№ п/п	Наименование оборудования	Количество
1	Семиполочные вагонетки для хлеба	44 шт.
2	Резальные машины типа Ленинградского механического завода	2 "
3	Сушильные вагонетки	35 "
4	Кассеты	1890 "
5	Столы для раскладки	8 пог. м.
6	Столы для упаковки	8 "
7	Весы десятичные	1 шт.
8	Весы половые	1 "
9	Столы для зашивки мешков	2 "
10	Ящики для хлеба	15 "
11	Тоннельные огневые сушилки конструкции ФТЛ-ВНИИХ	2 "
12	Центробежные вентиляторы "Сирокко" № 6 1/2 ср. д. . .	2 "
13	Центробежный вентилятор-дымосос "Сирокко" № 5 н. д.	1 "

Площадь и высота помещений цеха

Наименование помещения	Площадь (в м ²)	Высота (в м)
Прихожая	4,3	3,5
Гардеробная	12,5	3,5
Мужская раздевальная	2,8	3,5
" душевая	2,0	3,5
" одевальная	7,1	3,5
Курительная	7,8	3,5
Мужская уборная	3,6	3,5
Женская	3,6	3,5
" раздевальная	3,3	3,5
" душевая	5,8	3,5
" одевальная	9,3	3,5
Хлебохранилище	171,5	3,5
Помещение для резки хлеба и рас- кладки	451,8	3,5
Тоннельные сушилки	—	4,9
Упаковочная	—	3,5
Топочное отделение	—	—
Склад готовой продукции	67,4	3,0
Всего	752,8	—

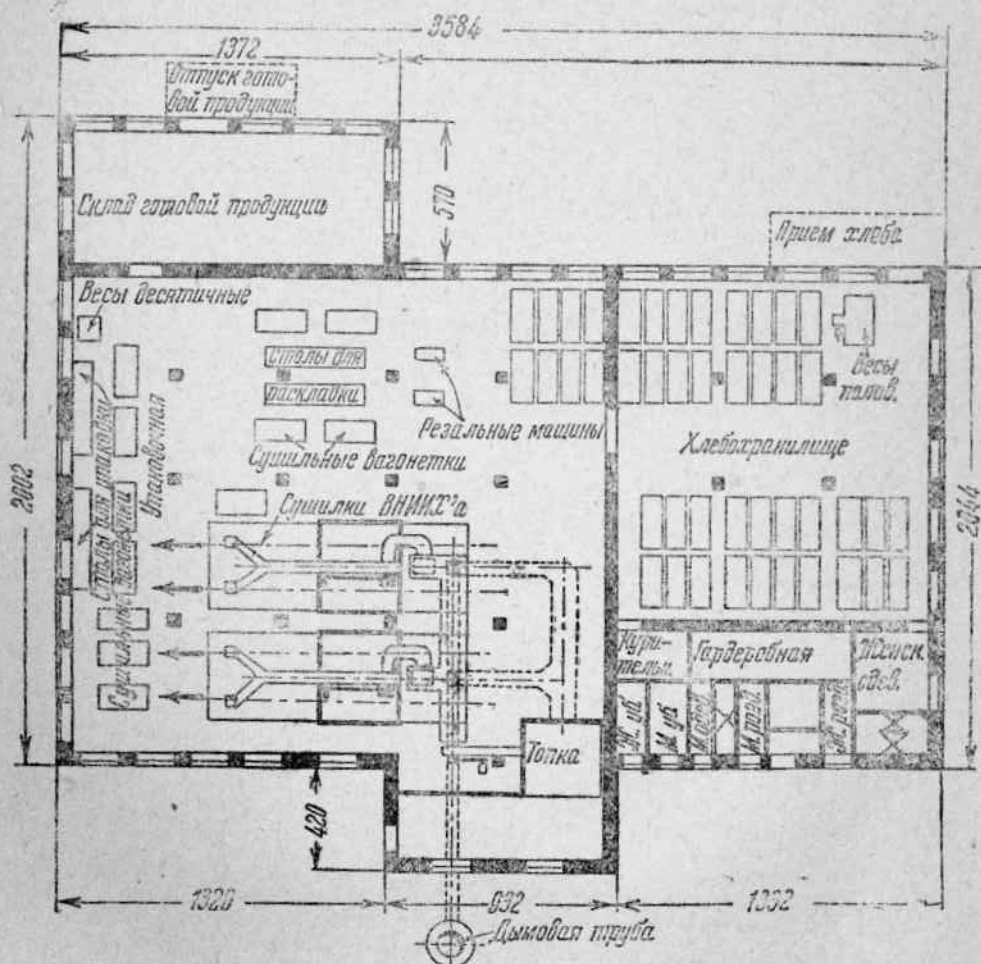


Рис. 46. Примерный план сухарного цеха

Отопление и вентиляция цеха

А. Отопление

Отопление паровое, низкого давления. Пар для нужд отопления и горячего водоснабжения поступает от существующей при хлебозаводе котельной.

Отопление предусматривается во всех помещениях цеха за исключением топочного отделения.

В помещениях сушилки, резки хлеба и упаковочной, ввиду наличия теплоизбытков от сушилок предусматривается дежурное отопление, которое включается только в то время, когда не работают сушилки, для поддержания температуры в помещении.

Нагревательными приборами отопления служат круглые ребристые трубы, расположенные под окнами у наружных стен.

Расчётная температура отапливаемых помещений

Склад готовой продукции	12°
Помещение для резки хлеба и упаковочная (дежурное отопление)	10°
Хлебохранилище	15°
Уборные, гардероб и вестбюль	16°
Душевые, раздевальные и одеваемые	25°

При невозможности получения необходимого количества тепла от котельной завода в цехе устраивается самостоятельное отопление, для чего устанавливается чугунный котелок Стреля.

Б. Вентиляция

В помещениях сухарного цеха основными вредностями являются:

- а) выделение тепла и влаги в хлебохранилище,
- б) выделение тепла в помещениях для резки хлеба, в упаковочной, в сушилках и топочном.

Для борьбы с вредностями предусмотрена механическая приточно-вытяжная вентиляция в хлебохранилище, помещениях для резки хлеба, сушики и упаковки; в душевых, уборных, курительной, складе готовой продукции и топочном отделении — естественная вытяжная вентиляция.

Вытяжка из всех помещений предусматривается естественная, через шахты.

Для сокращения расхода тепла подогрев приточного воздуха в зимнее время обеспечивается не путём установки калориферов, а путём подмешивания тёплого рециркуляционного воздуха из помещений, что вполне допустимо, так как никаких газовых вредностей в помещениях сухарного цеха нет.

Водоснабжение и канализация цеха

А. Водоснабжение

Снабжение водой цеха от существующей дворовой или внутренней водопроводной сети хлебозавода.

Для снабжения горячей водой санпропускника в душевой на кронштейнах устанавливается бойлер с подводкой к нему пара от сети отопления.

Б. Канализация

Спуск всех сточных хозяйственных, фекальных и душевых вод производится в существующую дворовую сеть хлебозавода или в городскую канализационную сеть.

Питание цеха электроэнергией осуществляется от существующей трансформаторной подстанции хлебозавода.

Подводка питания производится по двум кабельным вводам: один ввод на питание силовой нагрузки и освещения безопасности и второй ввод для осветительной нагрузки.

Присоединяемые мощности цеха равны:

Силовая нагрузка	36,42 <i>квт</i>
Освещение безопасности	1,14 "
Осветительная рабочая нагрузка	4,17 "

ХIV. СУШКА СУХАРЕЙ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

По соображениям уменьшения загрузки железнодорожного транспорта — перевозками сухарей от места их производства к месту их потребления, а иногда также и по соображениям оперативно-тактическим — часть сухарей целесообразно производить непосредственно в районе их потребления. В этих случаях на первое место выдвигаются полевые пекарни и хлебозаводы, работающие непосредственно во фронтовой полосе.

Производство сухарей в этих полевых условиях имеет свои особенности, в первую очередь в части типа и конструкции сушильных устройств, от которых требуется простота и несложность процесса их сооружения. Изготовление их должно быть рассчитано, как правило, на местные материалы, имеющиеся в наличии в районе сооружения сушилок.

Естественно, что в полевых условиях устройство вентиляторных сушилок, требующих питания электроэнергией, как правило, невозможно. Поэтому в подобных условиях для сушки сухарей используются либо простейшие хлебопекарные печи (напольные печи или уцелевшие в избах, так называемые «русские» печи), либо устраиваются простейшие безвентиляторные сушилки.

Сушка сухарей в полевых (напольных) печах

Для сушки сухарей могут быть использованы любые конструкции простейших жаровых печей, применяемых в полевых пекарнях: металлические разборные печи, например, типа ПХП-2 (рис. 47), либо одноярусные кирпичные напольные печи (рис. 48), либо двухъярусные напольные кирпичные печи. В последнем случае нижний под может быть использован для выпечки хлеба, при одновременной сушке сухарей на верхнем поду. Для этой цели могут также служить и деревенские жаровые печи.

Сушка сухарей может вестись в специальных металлических касетах, на листах или непосредственно на поду.

При сушке на листах и на поду сухари, примерно в середине периода сушки, необходимо переворачивать во избежание неравномерной их просушки и окраски.

При сушке сухарей непосредственно на поду последний после топки печи должен быть тщательно зачищен от остатков сгорания топлива.

Сушка сухарей в надпечных камерах

Для сушки сухарей над напольной печью, выпекающей хлеб, предложена инженером Шаховским шкафная сушилка, изображенная на рис. 49. Деревянные щиты, из которых составляется сушильный шкаф, для

удобства перевозки сделаны одного размера (80×20 см). Нижняя часть деталей шкафа обивается железом по войлоку.

Шкаф устанавливается, как показано на рис. 49, над кирпичной или металлической напольной печью, на кирпичных (на глине) столбиках или стенках.

В этих боковых стенках оставляют отверстия для доступа воздуха в сушильный шкаф. Для удаления воздуха в верхней части шкафа имеется вытяжная труба.

Для увеличения теплоотдачи от печи свод кирпичных печей оставляют без земляной засыпки. При установке сушильного шкафа над металлическим сводом напольной печи целесообразно, однако, сохранить лёгкую земляную засыпку. Без этого такая печь не обеспечивала бы ни нормальной выпечки хлеба, ни достаточно устойчивой отдачи тепла в сушильную камеру.

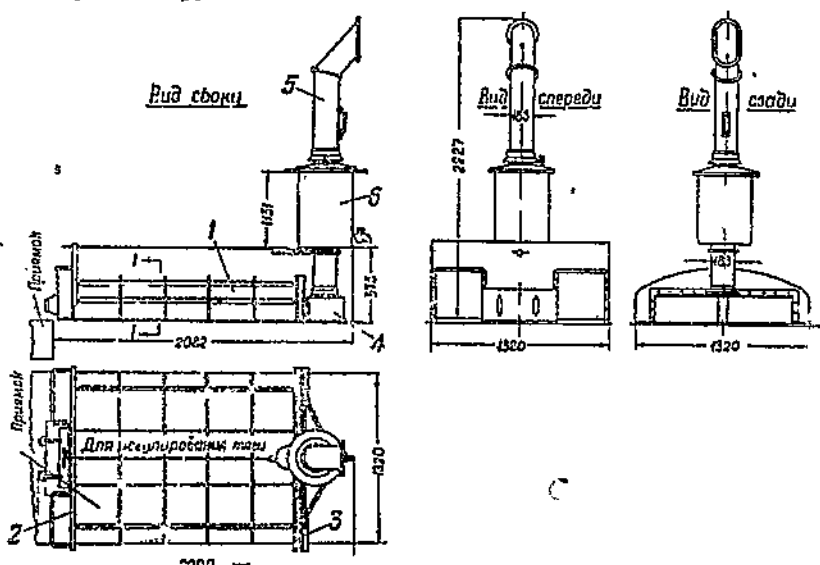


Рис. 47. Металлическая разборная печь типа ПХП-2

Сушка сухарей запроектирована на деревянных рамках (кассетах) с натянутой на них сеткой.

Суточная производительность такой сушилки достигает 200 кг. Для сушки сухарей могут быть использованы и любые другие типы кассет (металлические или деревянные для вертикальной укладки ломтей). Может быть применена и сушка сухарей на железных прутках толщиной 4—6 мм. В этом случае ломти хлеба нижней, более плотной частью, нанизываются на эти прутки с оставлением между ломтями зазоров в 1,5—2 см для омывания ломтей сушильным воздухом.

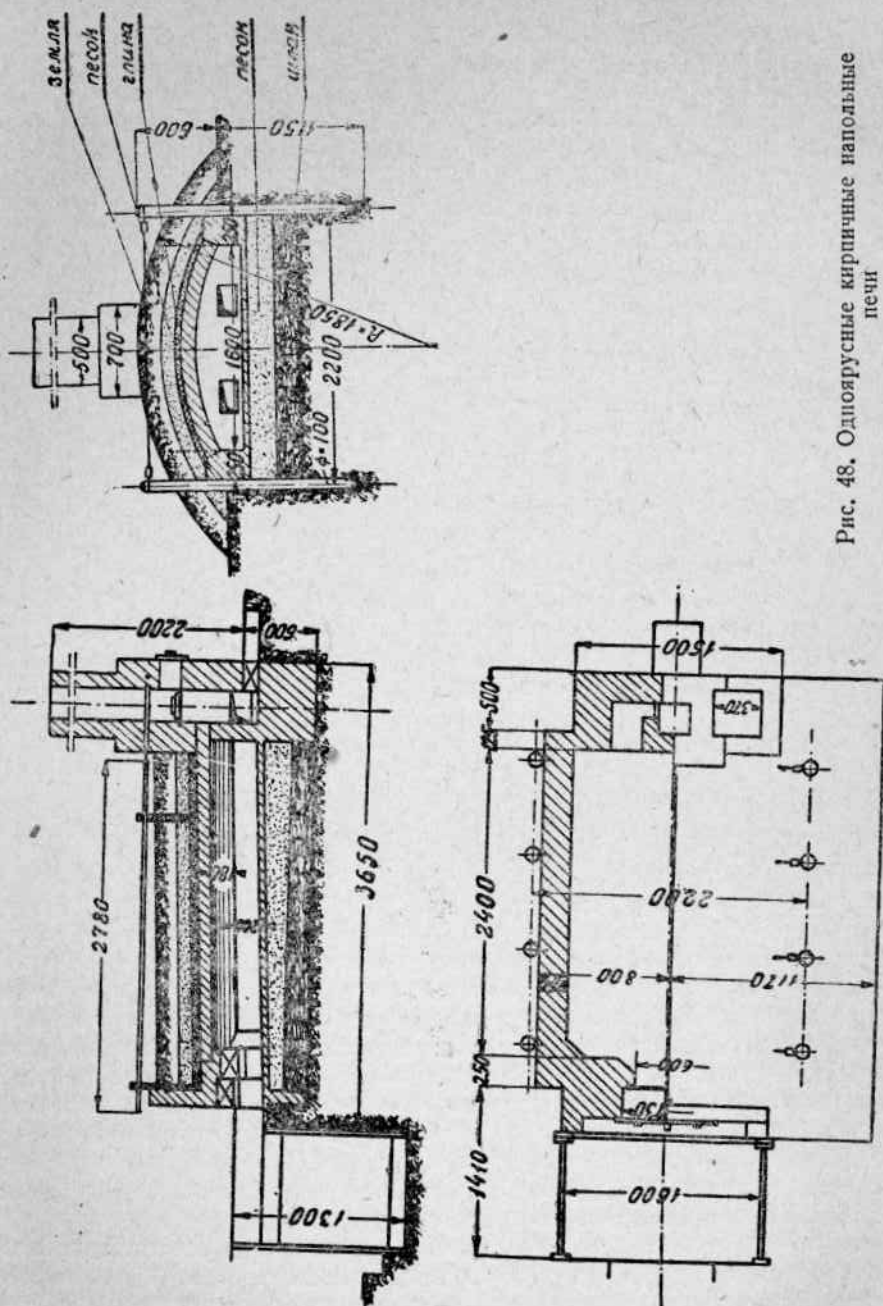
В случае сушки сухарей на кассетах с вертикальной укладкой или на прутках сушильная камера должна быть приспособлена для их установки на направляющих уголках или планках.

Сказанное здесь о сушке сухарей на прутках или в кассетах любого типа относится и к любой другой полевой сушилке.

Конструкция кассет зависит от наличия того или иного материала и возможностей для их изготовления.

Если позволяют местные условия и конструкция печи, поверх свода могут быть сделаны обороты (горизонтальные дымоходы) для дымовых газов, выходящих из пекарной камеры.

Может быть использована для сушки сухарей и специальная напольная печь со шкафной сушилкой над ней, предложенная инженерами



Николаевым и Караваевым (рис. 50). Сушка сухарей в нижних и верхних рядах кассет будет протекать неравномерно. Нижние ряды сухарей под действием лучистой теплоты от свода и соприкосновения с более тёплым и сухим воздухом будут сохнуть намного скорее верхних. Поэтому в процессе сушки кассеты этих рядов приходится менять местами.

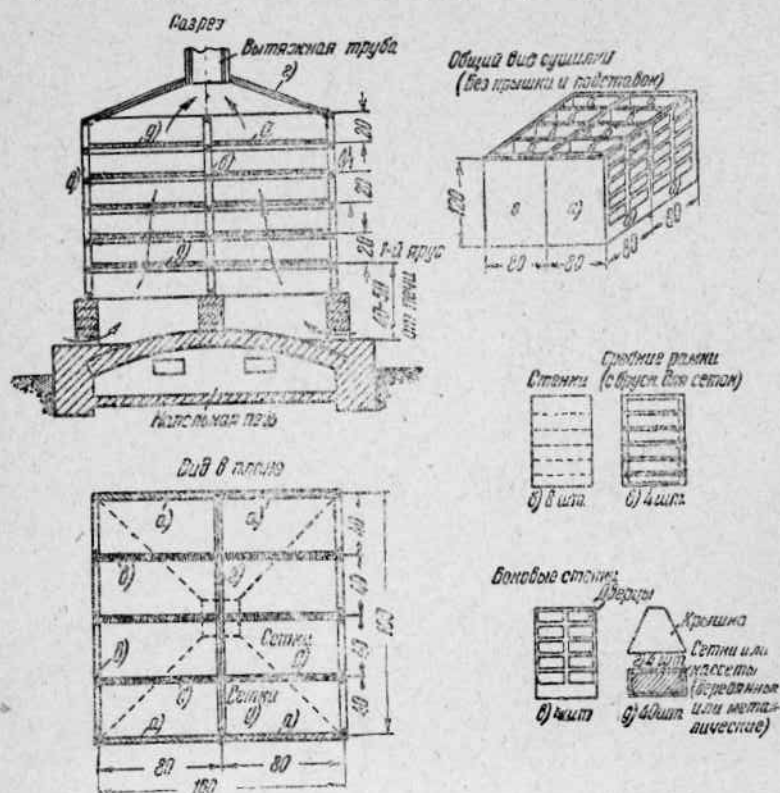


Рис. 49. Шафная сушилка инж. Шаховского

Сушка сухарей в специальных простейших сушилках

На рис. 51 изображена простейшая камерная сушилка, применяемая в фронтальных условиях. Для устройства этой сушилки подбирают помещение (лучше всего кирпичное) размерами 4×5 м, в одном из углов которого устанавливается кирпичная топочная камера 1 шириной около 1 м, высотой 1,2—1,5 м и длиной около 1,5 м. Топочная дверца должна выходить на улицу или в смежное помещение. Топочные газы из топки поступают в горизонтальный дымоход 2, идущий по несгораемому (цементному, щебеночному или земляному) полу помещения, вдоль стен, на некотором расстоянии от них. Горизонтальный дымоход переходит в вертикальный дымоход 3, по которому топочные газы выводятся в окружающую атмосферу.

В зависимости от наличия на месте тех или иных материалов, горизонтальный дымоход может быть либо кирпичным, либо железным (из листового железа), либо кирпичным и перекрытым сверху листовым железом или чугунными плитами.

Дымоход в свету должен иметь размеры не менее 16×16 см или диаметр не менее 18 см.

Участок дымохода 2а непосредственно после топки, во всех случаях должен быть из кирпича. Если сразу после топки поставить трубы

из листового (кровельного) железа, то они вследствие высокой температуры топочных газов быстро прогорают. Помимо этого теплоотдача от труб к нижним рядам сухарей будет слишком велика и будет приводить к слишком быстрой сушке и подгоранию нижнего ряда сухарей. Именно поэтому ближайший к топке участок горизонтального дымохода должен быть выполнен из кирпича. Длина этого участка не менее 1,5—2 м. Дальше целесообразно перейти к кирпичному дымоходу, перекрытому сверху железными или чугунными листами и плитами. Последнюю часть горизонтального дымохода ввиду низкой температуры топочных газов в этом месте целесообразно осуществлять из листового (кровельного или более толстого) железа.

Такое чередование материалов по ходу горизонтального дымохода обеспечивает и наибольшую его сохранность и наиболее равномерную теплоотдачу сухарям на всём его протяжении.

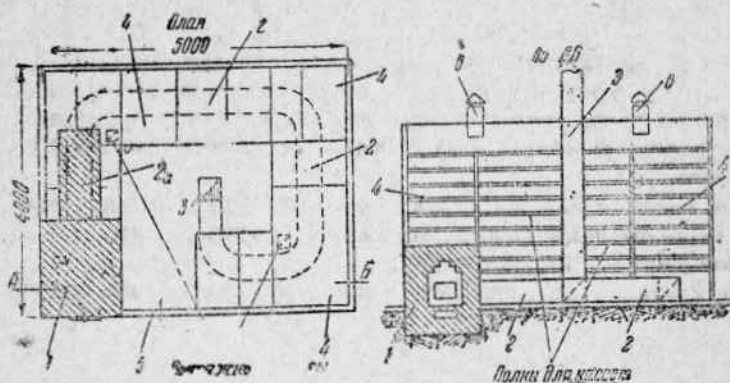


Рис. 51. Простейшая камерная сушилка

Над топкой 1 и всем протяжении дымохода 2 по стенам помещения расположены стеллажи 4 для кассет (или сетчатых рамок). Загрузка и разгрузка этих стеллажей производится через дверь 5. Естественно, что и в этой сушилке сухари в нижних рядах кассет сохнут скорее, чем в верхних, поэтому в процессе сушки целесообразно менять их время от времени местами.

Производительность сушилки при площади помещения 4×5 м равна примерно 600 кг сухарей в сутки.

Для удаления из сушилки насыщенного влагой сушильного воздуха в верхней части помещения сделаны вытяжки 6. Для поступления в сушилку свежего воздуха в нижней стене помещения должны быть сделаны соответствующие отверстия 7, снабжённые задвижками для регулирования притока воздуха.

Такие сушилки могут осуществляться в самых различных вариантах и размерах в помещениях, расположенных как выше уровня земли, так и в полуподвалах и подвалах или в землянках.

Таковы основные варианты сушильных устройств, рекомендованных и нашедших применение для сушки сухарей в полевых условиях.

Еще раз подчеркиваем, что это лишь примерные схемы сушильных устройств, которые на месте приходится сооружать применительно к наличию тех или иных помещений, тех или иных материалов и тех или иных возможностей для производства как самих сушилок, так и подсобного инвентаря (в первую очередь кассет).

Резка хлеба на ломти в полевых условиях чаще всего производится вручную имеющимися в наличии ножами.

На более крупных сухарных полевых предприятиях можно рекомендовать применение ручных хлеборезок, описанных в главе III.

Очень распространена резка хлеба полуломтиками, ускоряющая сушку и при невысокой температуре сушки уменьшающая растрескивание сухарей.

❖ Противопожарные мероприятия при сушке сухарей в полевых условиях

Поскольку при сооружении сушилок для сушки сухарей в полевых условиях широко используется дерево (стенки надпечных сушилок, каркасы стеллажей для кассет, часто и сами кассеты изготавливаются из дерева), постольку особое внимание должно уделяться противопожарным мероприятиям.

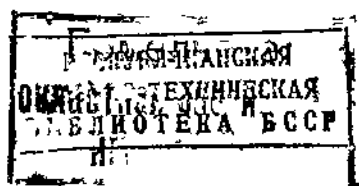
Все дымоходы, особенно горизонтальные, под стеллажами для сухарей, должны систематически проверяться на отсутствие в них трещин. Верхняя поверхность этих дымоходов, особенно если эта поверхность металлическая, должна тщательно очищаться от хлебных и сухарных крошек, возгорание которых может в ряде случаев послужить причиной пожара. Части деревянных деталей, соприкасающиеся с кладкой дымоходов, должны быть покрыты железом по войлоку, промазанному глиной, изолированы асбестом или другим доступным по местным условиям способом.

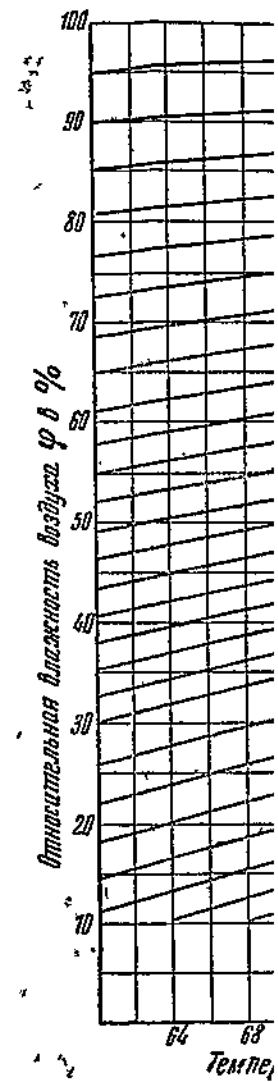
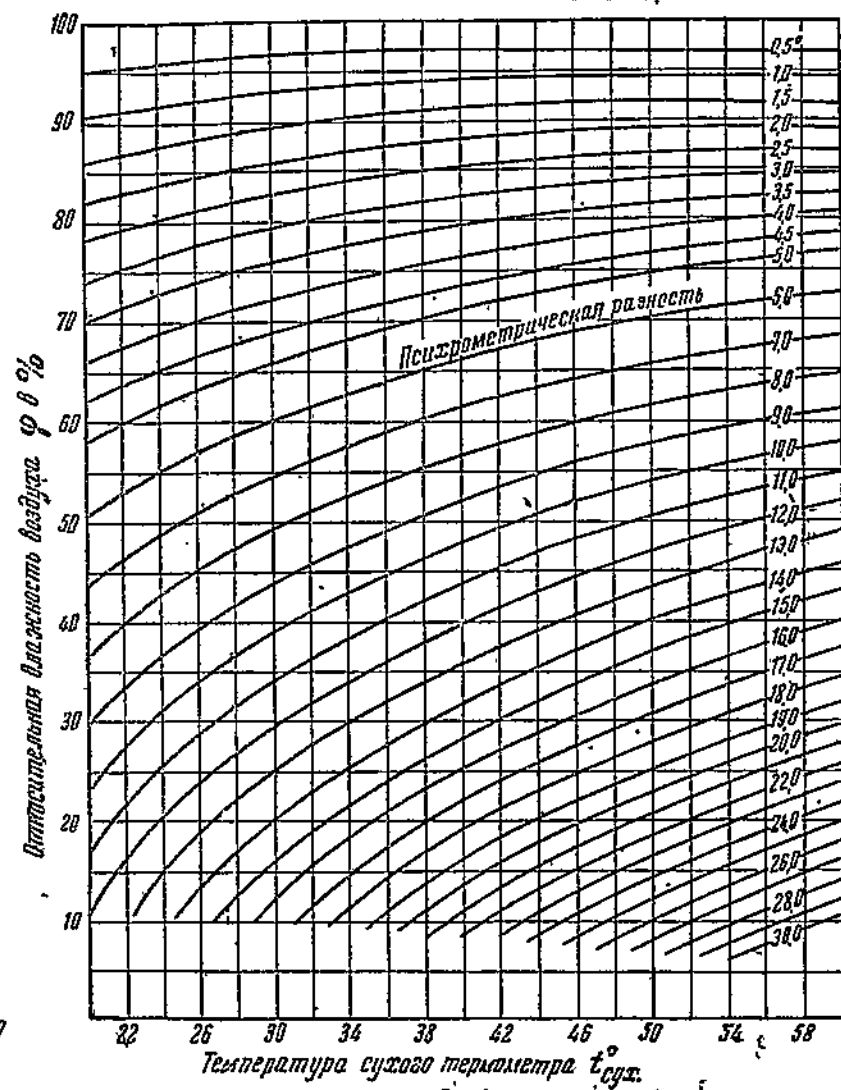
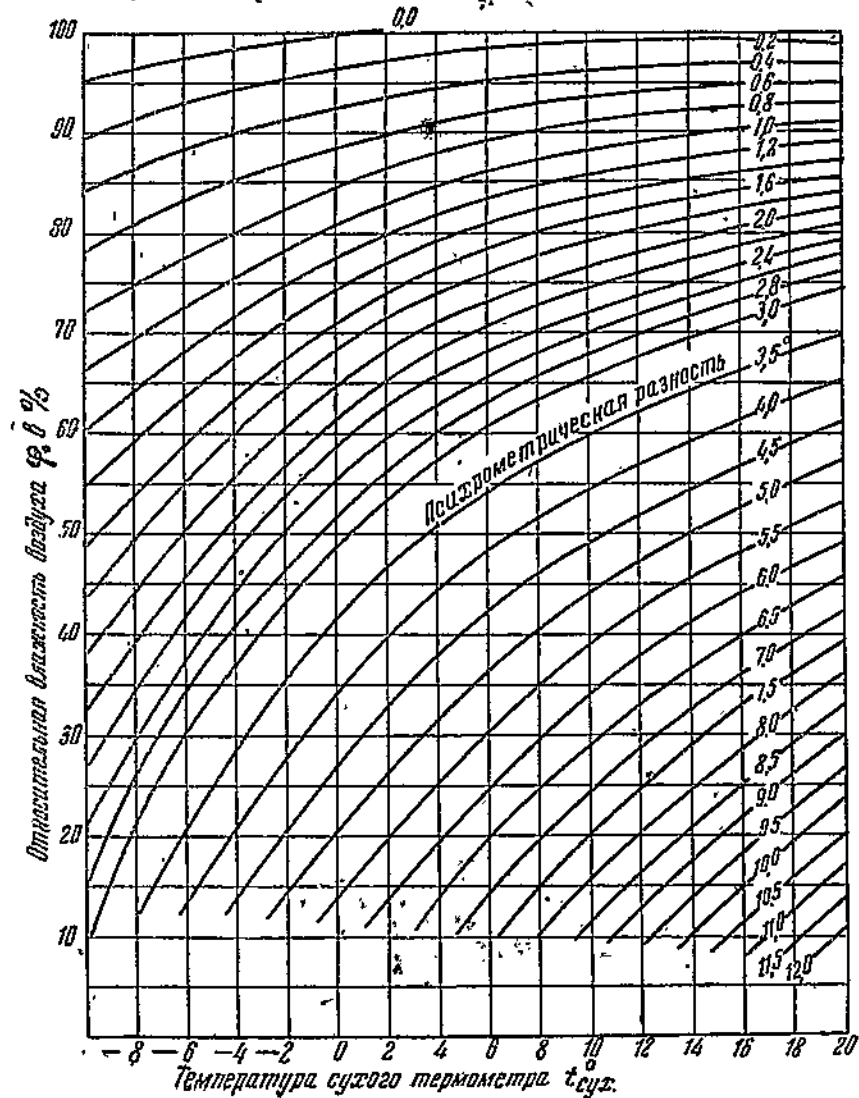
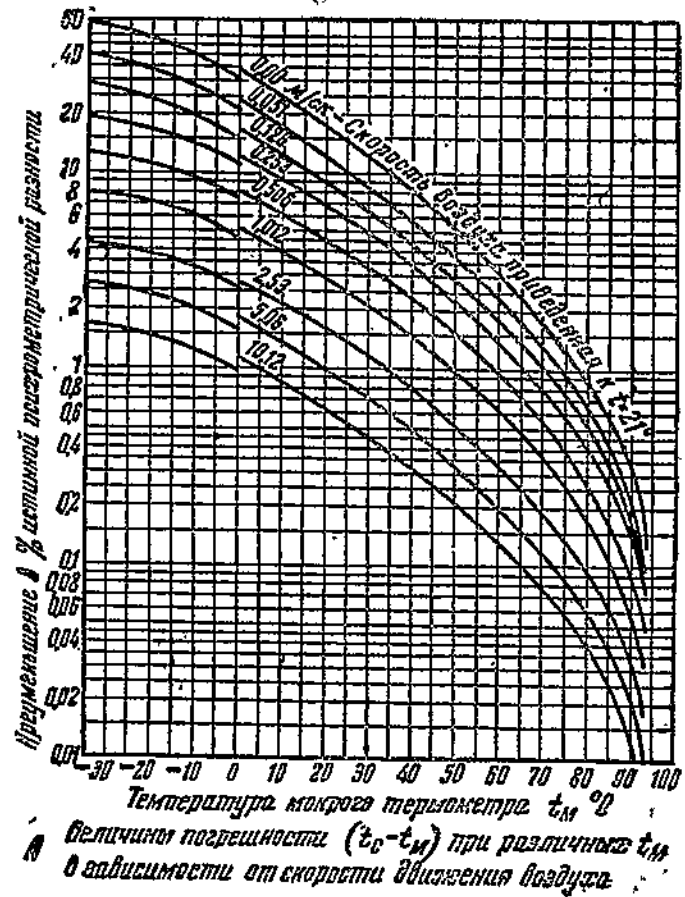
Нижняя часть стеллажей, расположенных над металлическими трубами или перекрытиями газоходов, также должна быть защищена от прямого воздействия их излучения.

Каждая сушилка должна быть снабжена простейшим противопожарным инвентарем.

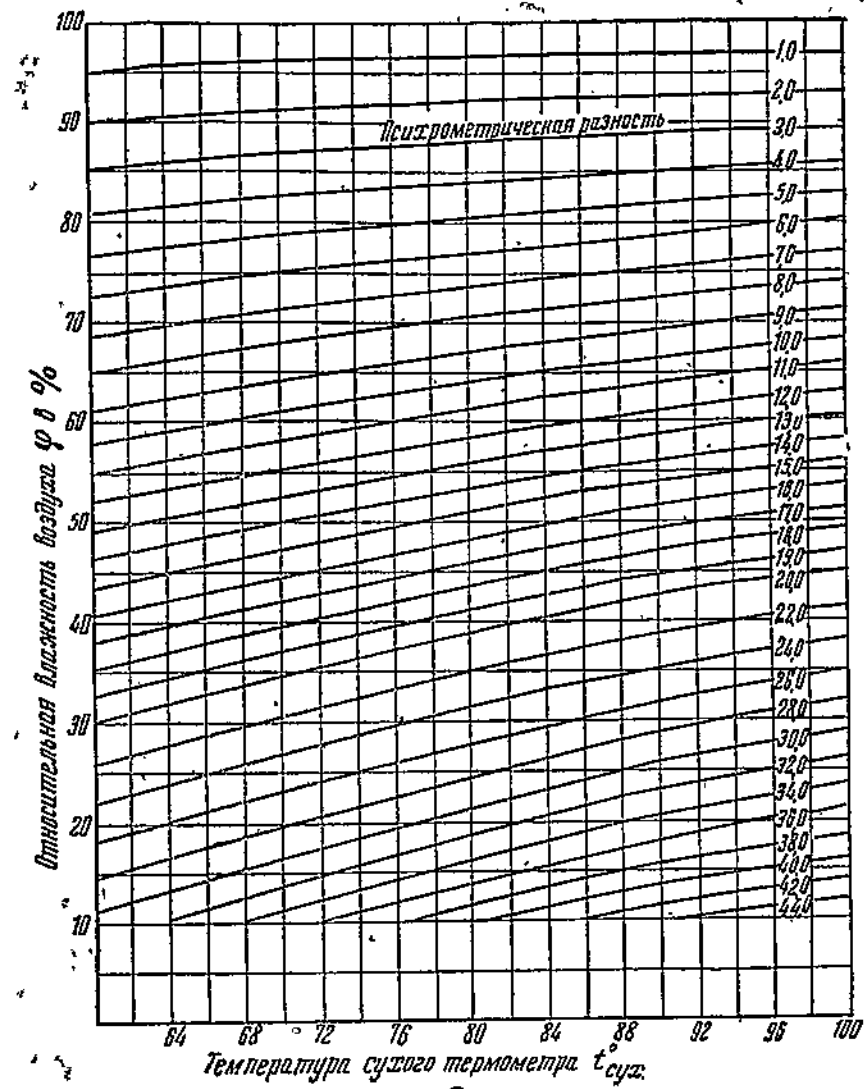
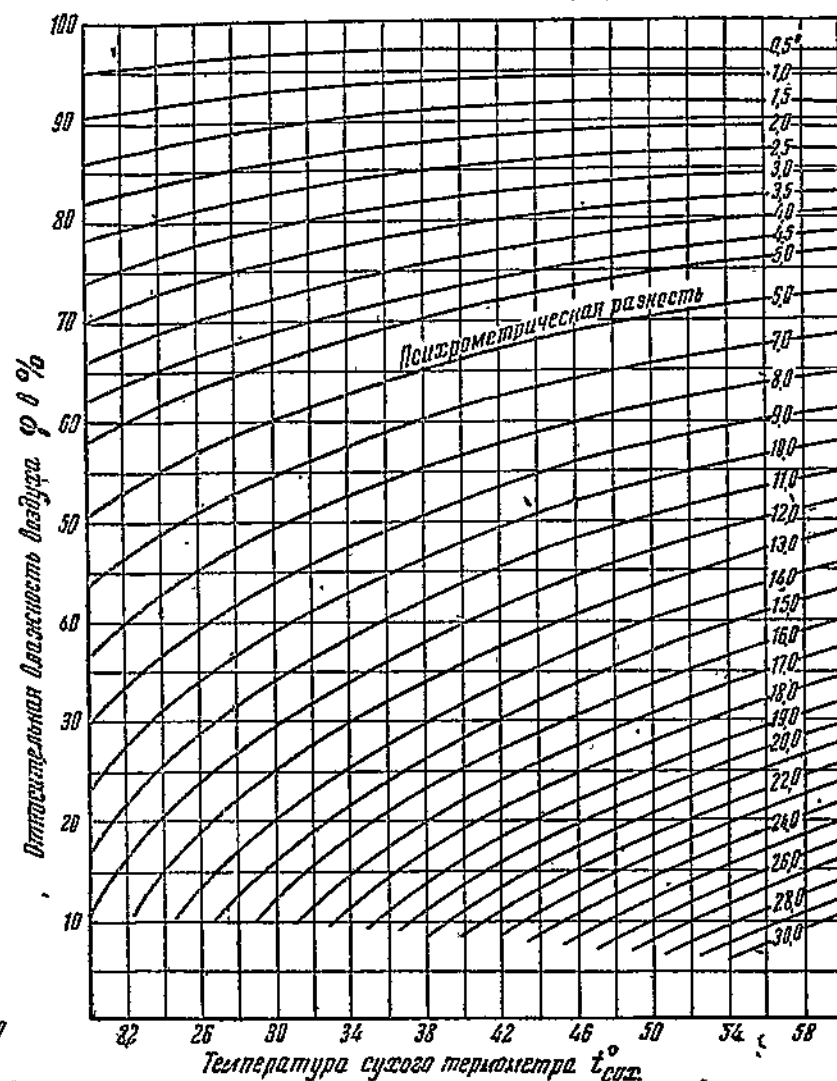
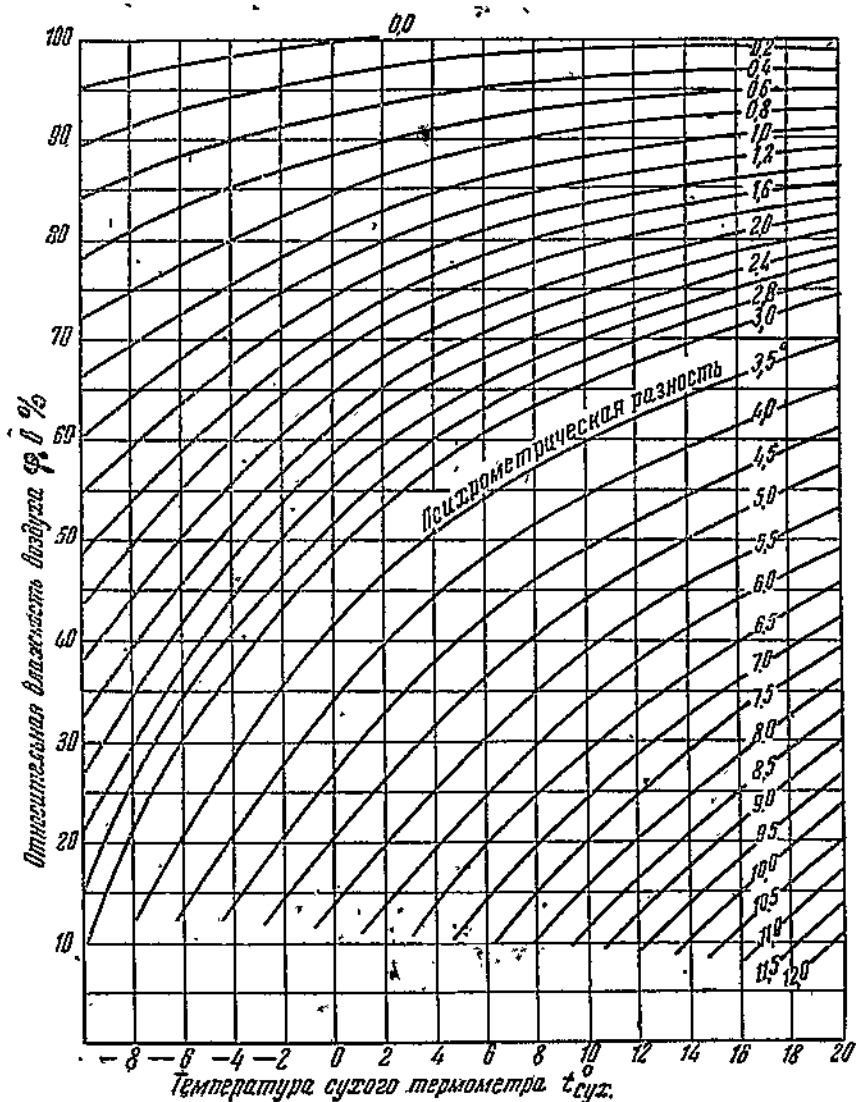
ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Н. П., Производство ржаных сухарей для армии, 1878.
2. Всесоюзный теплотехнический институт им. Ф. Э. Дзержинского. Сушильная лаборатория. Изыскание рационального режима сушки сухарей. Москва, 1940.
3. Всесоюзный научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности. Отчёт о научно-исследовательских работах за 1940 г., изд. ВНИИХП, Москва, 1942.
4. Главхлеб НКПП СССР. Технологические инструкции на хлебо-булочные изделия, Пищепромиздат, 1940.
5. Дегтярёв Н. В., Контрольно-измерительные приборы для отопительно-вентиляционных устройств, Стройиздат Наркомстроя, 1941.
6. Кирпичёв М. В., Михеев М. А. и Эйгенсон Л. С., Теплопередача, Государственное энергетическое издательство, 1940.
7. Лыков А. В., Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения, Гизлегпром, 1939.
8. Лурье М. Ю. Сушильное дело, ГОНТИ НКТП СССР, 1938.
9. Ауэрман Л. Я., Технология хлебопечения, Пищепромиздат, 1942.
10. Грум-Гржимайло В. Е., Пламенные печи, Госмашметиздат, 1932.





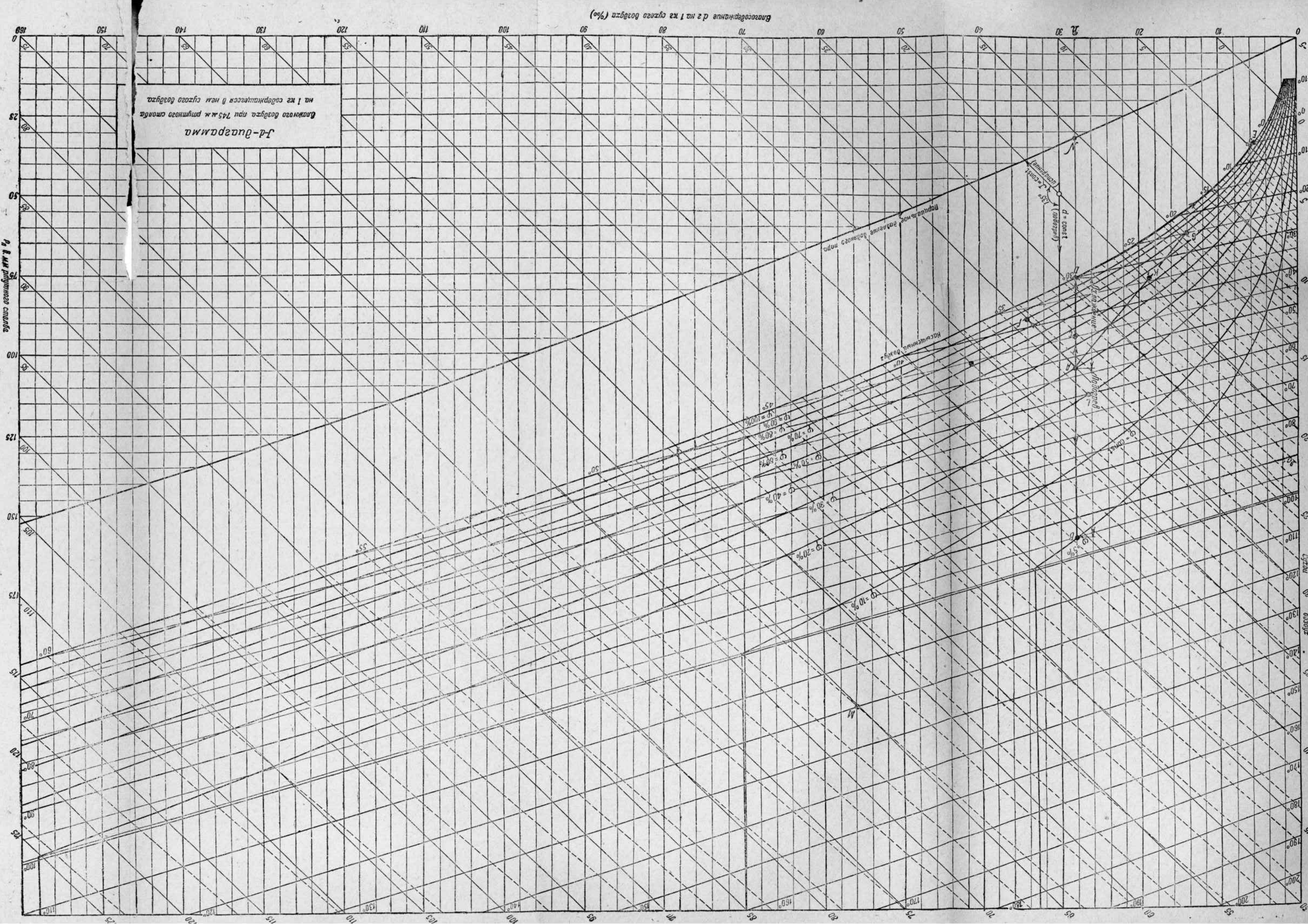
Психрометрические диаграммы для скоростей воздуха 2.0 м/сек (по данным ВТИ)



Психрометрические диаграммы для скоростей воздуха 2,0 м/сек
(по данным ВТИ)

$t^{\circ}\text{C}$ / $\varphi\%$		100		90		80		70		60		50		$t^{\circ}\text{C}$ / $\varphi\%$	
$t^{\circ}\text{C}$	$\varphi\%$	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	$t^{\circ}\text{C}$	$\varphi\%$
-15	-15	-2,98	1,04	-3,04	0,94	-3,10	0,83	-3,16	0,73	-3,23	0,62	-3,29	0,52	-15	-15
-10	-10	-1,43	1,63	-1,53	1,47	-1,63	1,30	-1,72	1,14	-1,82	0,98	-1,91	0,82	-10	-10
-5	-5	0,30	2,52	0,15	2,27	0,00	2,02	-0,15	1,76	-0,30	1,51	-0,45	1,26	-5	-5
0	0	2,30	3,85	2,06	3,46	1,83	3,07	1,61	2,69	1,37	2,30	1,15	1,92	0	0
5	5	4,50	5,51	4,16	4,95	3,83	4,40	3,50	3,85	3,17	3,29	2,84	2,74	5	5
10	10	7,08	7,78	6,60	7,00	6,13	6,21	5,66	5,43	5,19	4,65	4,72	3,87	10	10
15	15	10,15	10,86	9,48	9,76	8,82	8,66	8,16	7,56	7,50	6,47	6,84	5,38	15	15
20	20	13,88	15,00	12,95	13,46	12,02	11,94	11,10	10,42	10,19	8,91	9,28	7,41	20	20
25	25	18,45	20,50	17,17	18,39	15,89	16,29	14,63	14,21	13,37	12,14	12,12	10,08	25	25
30	30	24,14	27,78	22,38	24,89	20,63	22,03	18,90	19,19	17,18	16,37	15,48	13,59	30	30
35	35	31,27	37,37	28,86	33,43	26,48	29,54	24,13	25,70	21,80	21,90	19,50	18,14	35	35
40	40	40,31	49,98	37,02	44,62	33,78	39,35	30,59	34,16	27,45	29,05	24,36	24,0	40	40
45	45	51,86	66,57	47,36	59,28	42,96	52,14	38,65	45,15	34,43	38,31	30,29	31,60	45	45
50	50	66,74	88,42	60,58	78,47	54,59	68,79	48,76	59,38	43,08	50,21	37,56	41,29	50	50
55	55	86,18	117,50	77,69	103,80	69,49	90,60	61,58	77,86	53,94	65,57	46,57	53,70	55	55
60	60	112,05	156,64	100,15	137,54	88,82	119,35	78,01	102,00	67,68	85,44	57,81	69,61	60	60
65	65	147,15	210,31	130,19	183,15	114,27	157,69	99,32	133,77	85,24	111,26	71,90	89,95	65	65
70	70	196,30	285,99	171,37	246,21	148,49	209,73	127,43	176,15	107,98	145,16	89,88	116,33	70	70
75	75	268,20	397,29	229,89	336,37	195,84	282,25	165,37	233,85	137,95	190,31	113,17	150,96	75	75
80	80	380,22	571,34	317,27	471,60	263,90	387,06	218,09	314,53	178,35	251,62	143,54	196,55	80	80
85	85	574,83	874,65	459,03	691,72	368,15	548,25	294,96	432,75	234,77	337,78	181,40	258,35	85	85
90	90	981,06	1508,85	719,78	1097,51	542,29	818,24	413,93	616,33	316,82	463,62	240,80	344,13	90	90
95	95	2320,34	3601,74	1344,84	2071,68	886,03	1352,19	619,45	934,27	445,27	661,27	322,62	469,12	95	95
99,4	99,4	∞	∞	3710,31	5761,26	1660,04	2555,95	977,28	1488,73	636,11	955,60	431,56	636,07	99,4	99,4
100	100	∞	∞	3707,78	5754,47	1659,81	2554,20	977,26	1487,82	636,18	955,06	431,68	635,76	100	100
110	110	∞	∞	3726,23	5736,61	1669,34	2546,41	983,95	1483,54	641,38	952,42	436,01	634,12	110	110
120	120	∞	∞	3745,45	5720,56	1679,54	2539,86	990,95	1473,85	646,79	950,17	440,46	632,71	120	120
130	130	∞	∞	3765,41	5706,03	1690,05	2533,97	998,12	1476,53	652,37	943,23	445,01	631,48	130	130
140	140	∞	∞	3787,91	5695,28	1700,86	2528,65	1005,63	1473,79	658,06	946,50	449,66	630,42	140	140
150	150	∞	∞	3810,11	5685,22	1712,08	2524,09	1013,22	1471,23	663,87	944,98	454,36	629,47	150	150
160	160	∞	∞	3831,64	5674,02	1723,57	2520,04	1021,08	1469,09	669,80	943,67	459,14	628,64	160	160
170	170	∞	∞	3855,23	5665,95	1735,53	2516,71	1029,01	1467,12	675,79	942,47	463,97	627,90	170	170
180	180	∞	∞	3879,05	5658,49	1747,61	2513,67	1037,10	1465,44	681,90	941,47	468,85	627,26	180	180
190	190	∞	∞	3903,26	5651,63	1759,85	2510,86	1045,30	1463,90	688,06	940,55	473,78	626,67	190	190
200	200	∞	∞	3929,18	5647,35	1772,22	2503,29	1053,56	1462,47	694,28	939,70	478,75	626,15	200	200

t° C	φ%	40		30		20		10		5		0		t° C	φ%
		i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d		
-15	-15	-3,35	0,42	-3,41	0,31	-3,47	0,21	-3,53	0,10	-3,56	0,05	-3,59	0,00	-15	-15
-10	-10	-2,01	0,65	-2,11	0,49	-2,20	0,33	-2,30	0,16	-2,35	0,08	-2,39	0,00	-10	-10
-5	-5	-0,60	1,01	-0,75	0,75	-0,90	0,50	-1,50	0,25	-1,12	0,13	-1,20	0,00	-5	-5
0	0	0,91	1,53	0,69	1,15	0,46	1,09	0,23	0,38	0,11	0,19	0,00	0,00	0	0
5	5	2,51	2,19	2,18	1,64	1,85	1,09	1,53	0,55	1,36	0,27	1,20	0,00	5	5
10	10	4,25	3,09	3,78	2,31	3,32	1,54	2,86	0,77	2,62	0,38	2,39	0,00	10	10
15	15	6,19	4,30	5,54	3,22	4,88	2,14	4,24	1,07	3,91	0,53	3,59	0,00	15	15
20	20	8,37	5,91	7,47	4,42	6,57	2,94	5,68	1,47	5,23	0,73	4,79	0,00	20	20
25	25	10,88	8,04	9,64	6,01	8,42	3,99	7,20	1,99	6,59	0,99	5,99	0,00	25	25
30	30	13,79	10,82	12,12	8,08	10,46	5,36	8,82	2,67	8,00	1,33	7,19	0,00	30	30
35	35	17,23	14,43	14,98	10,76	12,76	7,13	10,56	3,55	9,47	1,77	8,39	0,00	35	35
40	40	21,31	19,07	18,32	14,0	15,37	9,40	12,45	4,66	11,01	2,32	9,58	0,00	40	40
45	45	26,23	25,03	22,25	18,58	18,36	12,27	14,53	6,07	12,65	3,02	10,78	0,00	45	45
50	50	32,18	32,60	26,93	24,13	21,82	15,88	16,84	7,84	14,40	3,90	11,98	0,00	50	50
55	55	39,45	42,24	32,55	31,15	25,89	20,43	19,43	10,05	16,28	4,98	13,18	0,00	55	55
60	60	48,38	54,48	39,33	39,98	30,67	26,10	22,36	12,78	18,33	6,33	14,38	0,00	60	60
65	65	59,43	70,02	47,58	51,08	36,35	33,15	25,70	16,14	20,58	7,97	15,53	0,00	65	65
70	70	73,24	89,83	57,66	65,03	43,13	41,90	29,53	20,27	23,05	9,97	16,78	0,00	70	70
75	75	90,64	115,21	70,09	82,60	51,26	52,74	33,95	25,30	25,81	12,40	17,99	0,00	75	75
80	80	112,82	147,56	85,51	104,77	61,07	66,15	39,08	31,41	28,89	15,32	19,19	0,00	80	80
85	85	141,65	190,95	104,92	133,07	73,02	82,83	45,07	38,84	32,36	18,83	20,39	0,00	85	85
90	90	179,69	248,12	129,53	169,31	87,61	103,54	52,09	47,81	36,28	23,02	21,59	0,00	90	90
95	95	231,61	326,60	161,43	216,75	105,69	129,55	60,35	58,68	40,73	28,02	22,79	0,00	95	95
99,4	99,4	295,35	423,39	198,35	271,66	125,59	158,08	68,94	70,23	45,20	33,24	23,85	0,00	99,4	99,4
100	100	295,50	423,21	198,35	271,66	125,59	158,08	68,94	70,23	45,20	33,24	24,00	0,00	100	100
110	110	299,22	422,19	201,62	271,05	128,51	157,90	71,74	70,09	47,87	33,18	26,40	0,00	110	110
120	120	303,02	421,31	204,94	270,94	131,47	157,62	74,39	69,97	50,40	33,13	28,81	0,00	120	120
130	130	306,88	420,55	208,30	270,07	134,43	157,37	77,06	69,87	52,92	33,08	31,21	0,00	130	130
140	140	310,79	419,88	211,69	269,67	137,43	157,16	79,73	69,78	55,46	33,04	33,62	0,00	140	140
150	150	314,76	419,28	215,11	269,32	140,44	156,97	82,41	69,71	58,00	33,01	36,03	0,00	150	150
160	160	318,77	418,78	218,56	269,01	143,45	156,79	85,10	69,64	60,53	32,97	38,4	0,00	160	160
170	170	322,81	418,32	222,03	268,74	146,50	156,66	87,79	69,58	63,08	32,95	40,86	0,00	170	170
180	180	326,88	417,92	225,52	268,54	149,54	156,53	90,48	69,52	65,63	32,92	43,27	0,00	180	180
190	190	331,03	417,62	229,03	268,28	152,60	156,41	93,19	69,48	68,18	32,90	45,69	0,00	190	190
200	200	335,11	417,22	232,55	268,08	155,66	156,30	95,89	69,43	70,73	32,88	48,10	0,00	200	200



Влажность воздуха d 2 мм 1 кг сухого воздуха (%)

Влажность воздуха d 2 мм 1 кг сухого воздуха (%)

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	2
I. Схема производства сухарей	3
II. Хлеб для производства сухарей	4
III. Подготовка хлеба к сушке	6
Выдержка хлеба перед резкой его на ломти	6
Резка хлеба на ломти	7
Резка хлеба вручную ножом	9
Резка хлеба ручными хлебоборезками	9
Механические хлебоборезки	11
Отбраковка и сортировка нарезанных ломтей	12
Укладка ломтей хлеба в кассеты (или на листы)	12
IV. Физические основы процесса сушки сухарей	13
Теплота	13
Понятие о количестве теплоты	15
Теплоёмкость	16
Расчёт количества тепла, затрачиваемого при нагревании какого-либо тела или освобождаемого при его остывании	16
Теплосодержание	17
Переход тепла от одного тела к другому	18
Свойства газов	23
Показатели состояния газа	23
Газовые смеси	28
Водяной пар	30
Газообразное, жидкое и твёрдое состояние тел	30
Испарение воды со свободной поверхности	33
Испарение воды при кипении	34
Теплосодержание водяного пара	35
Влажный воздух	36
Абсолютная влажность воздуха	37
Относительная влажность воздуха	37
Удельный вес влажного воздуха	40
Теплосодержание влажного воздуха	40
<i>i</i> — <i>d</i> -диаграмма	41
Влажность материала	47
Классификация влаги в материале с точки зрения связи влаги с продуктом	48
Влажность продукта с точки зрения процесса сушки	48
V. Явления, происходящие в процессе сушки сухарей	51
Факторы, влияющие на скорость внешней и внутренней диффузии влаги в процессе сушки	53
VI. Основные понятия о работе сушилки	58
Изменение параметров воздуха при прохождении через сушильный агрегат	58
Материальный баланс сушилки	59
Баланс влаги и расход воздуха на сушку	61
Тепловой баланс сушилки	61
Варианты сушильного процесса	62
VII. Факторы, влияющие на ход сушки сухарей	63

	Стр.
XIII. Сухарный цех производительностью 16 т сухарей в сутки	116
Описание сухарного цеха	116
Производственный поток цеха	116
Отопление и вентиляция цеха	119
Водоснабжение и канализация цеха	119
Электроснабжение цеха	120
XIV. Сушка сухарей в полевых условиях	120
Сушка сухарей в полевых (напольных) печах	120
Сушка сухарей в надпечных камерах	120
Сушка сухарей в специальных простейших сушилках	123
Противопожарные мероприятия при сушке сухарей в полевых условиях	126
Литература	126

ПРИЛОЖЕНИЯ:

1. Психрометрические диаграммы
2. Таблица теплосодержания и влагосодержания влажного воздуха
3. $T-d$ -диаграмма

~~23/31~~

Юви
ити
По
Си
млю
Ка
Р
уш
асс
Суш
Тин
Тон
Тон
Тон
Тон
Су
Эл
Ва
Су

На

П
Г
В

Редактор Р. И. Калменс

Л. 39850.	Подписано к печати 7/IX 1943 г.
печ. л. 81/4	Уч. ав. 12 л.
Тираж 2000 экз.	Цена 8 руб. Зак. 13

Калуга, типография им. Воровского

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
35	15 снизу форм. (30)	$(t_{н.п.} - t_{н.п.})$	$(t_{н.п} - t_{н.п})$
46	27 снизу	Значения t_c равны значениям t_n	Значения t_c равны значениям t_m
47	посредине	$= 6,5\%$ сухого воздуха.	$= 6,5\%$.
60	3 и 5 сверху	$W_{хл}$ — абсолютная влажность воздуха	$W_{хл}^a$ — абсолютная влажность воздуха
60	3 и 5 сверху	$W_{сух}$ — абсолютная влажность воздуха	$W_{сух}^a$ — абсолютная влажность воздуха
79	15 снизу	$\frac{W_3 \gamma}{2 g}$	$\frac{v^2 \gamma}{2 g}$