

В 29

126/—

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. А. М. ГОРЬКОГО

М. В. ВЕНЕДИКТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНОЙ ВЛАГИ
В ТИПИЧНОМ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ ТЕЛЕ
В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Автореферат

диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

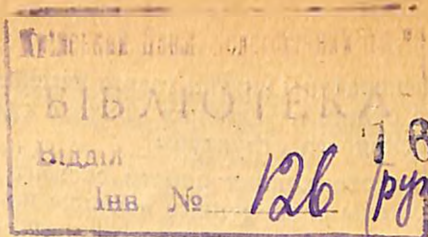
Научный руководитель, кандидат физико-математических наук,
доцент М. Ф. КАЗАНСКИЙ.

Киев—1955 г.

НБ НПУ
імені М.П. Драгоманова



100310838



53
Вен

В настоящей работе исследовано движение свободной влаги в типичном капиллярно-пористом теле в процессе сушки при мягких режимах.

Вскрытие законов движения тепла и влаги внутри вещества необходимо как для развития теории гигро- и гидротермических процессов, так и для нахождения теории научно обоснованного режима сушки, обеспечивающего наилучшее сохранение технологических свойств высушиваемых материалов и для грамотного конструирования сушильных устройств.

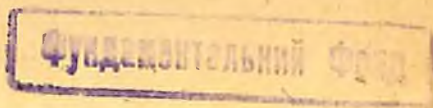
Сушка влажных материалов, являясь одним из частных случаев тепло- и массообмена, широко применяется в нашем народном хозяйстве. В развитии теории и практики сушки нашей отечественной наукой сделан значительный вклад. Основные положения механизма сушки были высказаны нашим соотечественником Л. С. Коссовичем еще в 1904 г. задолго до работ зарубежных ученых.

Значительное число работ по теории сушки принадлежит профессору А. В. Лыкову. В своих монографиях «Теория сушки» и «Явления переноса в капиллярно-пористых телах» А. В. Лыков разработал основные положения происходящего в процессе сушки переноса тепла и влаги внутри тела. Рассматривая процесс сушки влажных материалов, как коллоидно-теплофизический процесс, А. В. Лыков уделяет основное внимание зависимости процесса сушки от форм связи влаги с материалом.

Ряд вопросов сушки нуждается в дальнейшем экспериментальном изучении. В первую очередь это относится к случаю движения свободной влаги в капиллярно-пористом теле. Экспериментальные работы в этой области не лишены недостатков и неполны. (1)

Так, еще остается недостаточно ясным вопрос о физической природе критических точек как кривой скорости сушки, так и кривых зависимости влаго- и термовлагопроводности от влажности.

В нашей работе рассматриваются следующие вопросы: 1) взаимосвязь критических точек кривых скорости сушки и кривых зависимости влагопроводности и термовлагопроводности от влажности с критическими состояниями влаги, обусловленными различным расположением ее, в капиллярно-пористом теле; 2) распределение



влаги и температуры внутри тела и изменение этого распределения в процессе сушки в условиях опыта с одним и тем же образцом без нарушения его структуры.

Вся диссертационная работа состоит из трех глав. В первой главе изложены современные взгляды на законы движения влаги в капиллярно-пористом теле в соответствии с развиваемой профессором А. В. Лыковым теорией тепло- и массообмена. Особое внимание, как это делается в работах советских ученых, уделено вопросам изучения физической природы и механизма движения влаги внутри тела при критических влажностях, которые характеризуются критическими точками кривой скорости сушки и кривых зависимости коэффициентов влаго- и термовлагопроводности (k_v и δ), — коэффициентов потенциалопроводности и термоградиентного коэффициента — по новой терминологии А. В. Лыкова, — от влажности. Указывается, что только при таком подходе к процессу сушки можно объяснить все особенности протекания этого процесса в капиллярно-пористых телах.

В первой главе указывается, что объяснение существования критических точек на кривой скорости сушки в случае сушки капиллярно-пористого тела следует искать не в каких-то различных физических состояниях влаги (свободная, адсорбционно-связанная вода), а в различном расположении ее внутри тела (капиллярное состояние, состояние заземленного воздуха, заземленной влаги).

Во второй главе дан обзор современных методов изучения механизма движения влаги и дано описание разработанных нами экспериментальных установок. Описана предложенная нами установка по определению гидротермического поля внутри капиллярно-пористого тела в процессе сушки без нарушения его структуры и методика работы с нею. В качестве типичного капиллярно-пористого тела выбран кварцевый песок пяти фракций: 1,2—0,8; 0,8—0,6; 0,6—0,3; 0,3—0,15; 0,15—0,05 мм.

Существующие методы определения поля влажности по способу разрезания образца на слои с последующим определением средней влажности высушиванием ведут к физическому уничтожению образца. Это не позволяет проследить за движением влаги на одном образце в процессе всей сушки. Разрезания образца на слои так же не предотвращает перераспределение влаги при самом анализе поля влажностей.

Разработанная нами методика устраняет этот недостаток. Распределение влаги внутри капиллярно-пористого тела определяется путем измерения диэлектрической проницаемости. Известно, что в случае равномерного распределения влаги внутри материала

(если температура и проводимость вещества в процессе измерения не изменяется) существует однозначная зависимость между влажностью и диэлектрической проницаемостью.

Внутри сушимого образца (толщина 2,4 см во всех случаях) на равном расстоянии по высоте (4 мм) заделывались шесть конденсаторов с пластинами шириною в 1 мм, ориентированными вдоль потока влаги. Специальными опытами выяснено, что даже в таких узких конденсаторах влага распределена неравномерно. Теоретические рассуждения, приведенные в той же главе, показывают, что в случае неравномерного распределения влаги в кварцевом песке существует однозначная зависимость между «средней влажностью» и «средней диэлектрической проницаемостью». Эта зависимость получалась нами по данным ДП измеряемыми приборами экспериментальной установки.

Градуировочные кривые, выражающие зависимость между «средней влажностью» и «средней диэлектрической проницаемостью», могут быть получены по способу сушки тонких слоев кварцевого песка, исследуемых с помощью одного конденсатора, расположенного внутри слоя. Необходимая толщина слоя была найдена экспериментально для данной конструкции конденсатора на основании анализа электрического поля внутри диэлектрика.

При разработке методики было учтено, что внутри капиллярно-пористого тела в процессе сушки существует неравномерное температурное поле, которое в свою очередь может влиять на изменение диэлектрической проницаемости влажного песка. Нами было изучено температурное поле в процессе сушки и определена как теоретически, так и экспериментально зависимость диэлектрической проницаемости влажного кварцевого песка от температуры. Как показали опыты, в случае сушки влажного кварцевого песка в мягком режиме (температура воздуха 28°C, относительная влажность воздуха 70—80%, сушка в термостатном шкафу без искусственного потока воздуха) погрешность, вносимая неоднородным температурным полем в определение поля влажностей не превышает 0,2% влажности. Общая погрешность методики определения поля влажностей составила $\pm 2,5\%$.

Физический смысл критических точек кривых скорости сушки и критических точек кривых зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности можно выяснить только в том случае, когда они отнесены к влажности на поверхности.

Критические значения, рассчитанные для средней влажности, не имеют смысла, т. к. они зависят от толщины изучаемого образца. Изучая поле влажностей и температур на протяжении всего процесса сушки на одном и том же образце, мы смогли отнести

критические точки кривых скорости сушки и кривых зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности к влажности на поверхности.

Для того, чтобы сравнить влажности, при которых имеют место критические значения кривой скорости сушки и кривых зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности, со значениями критических влажностей капиллярно-пористого тела (капиллярное состояние, состояние защемленной влаги, состояние защемленного воздуха) кривые отрицательного капиллярного давления, соответствующие этим состояниям, также были отнесены к влажности на поверхности.

Строя кривые отрицательного капиллярного давления для образцов различной толщины (2; 1,5; 0,5 см), можно найти зависимость между положением критических точек кривых и толщиной слоя. Путем экстраполяции этой зависимости на слой нулевой толщины (поверхностный слой) были определены значения критических влажностей для капиллярно-пористого тела.

С этими влажностями сравнивались величины влажностей, соответствующих критическим точкам кривых скорости сушки и кривых зависимости коэффициентов влаго- и термовлагопроводности от влажности.

Полученные экспериментальным путем кривые распределения влаги и температуры внутри капиллярно-пористого тела в процессе сушки при мягком режиме показали, что градиент влажности в поверхностном слое мал, а поэтому существующие методы определения коэффициентов влаго- и термовлагопроводности из-за значительной погрешности не применимы.

Нами было предложено использовать при определении коэффициента влагопроводности $k\gamma$ кривые отрицательного капиллярного давления. Эта методика основана на решении уравнения движения вязкой жидкости внутри капиллярно-пористого тела, предложенного А. П. Порхаевым (2). Формула для подсчета $k\gamma$ имеет вид:

$$k\gamma = \frac{\gamma_0 \sigma^2}{2\eta} \cdot \frac{1}{\rho^2} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial w} \right)_w \quad 1.$$

где γ_0 — удельный вес движущейся жидкости; σ — ее поверхностное натяжение; η — вязкость; ρ — отрицательное капиллярное давление и w — влажность. Величины $\left(\frac{\partial \rho}{\partial w} \right)_w$ находились для определенной влажности на кривых отрицательного капиллярного давления графически.

Нами получен следующий характер зависимости коэффициента влагопроводности от влажности: коэффициент влагопроводности $k\gamma$ с уменьшением влажности от 20% до 7—10% (для различных фракций кварцевого песка) медленно убывает; с последующим уменьшением влажности до 3—4%, коэффициент $k\gamma$ медленно возрастает.

Найденная зависимость коэффициента влагопроводности от влажности, кривые распределения влажности и температуры и кривые скорости сушки, отнесенные к поверхностному слою, на основании основного закона влаго- и -термовлагопроводности, установленного проф. Лыковым А. В. для поверхностного слоя дали возможность вывести формулу для подсчета зависимости коэффициента термовлагопроводности δ от влажности. Эта формула имеет вид:

$$\delta = \frac{2\eta m^2}{\gamma^2} \frac{t^2}{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_w \left(\frac{\partial t}{\partial w}\right)_w}$$

где m — скорость сушки, $\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_w$ — температурный градиент в поверхностном слое, остальные обозначения прежние.

Получена следующая зависимость коэффициента термовлагопроводности от влажности: при уменьшении влажности от 20% до 7—10% (для разных фракций) коэффициент термовлагопроводности увеличивается, с последующим уменьшением влажности от 3—4% коэффициент термовлагопроводности δ убывает.

Результаты опытов могут быть представлены следующей таблицей.

	Размеры фракций в мм			
	1,2—0,8	0,8—0,6	0,6—0,3	0,3—0,15
Первая критическая точка кривой скорости сушки m	7,5%	8,0%	9,0%	10,0%
Первая критическая точка кривой зависимости коэфф. $k\gamma$ и δ от влажности	8,0%	8,5%	8,6%	10,0%
Вторая критическая точка кривой отрицательного капиллярного давления	7,5%	8,2%	8,4%	10,2%
Вторая критическая точка кривой скорости сушки m	2,7%	2,8%	3,8%	3,7%
Третья критическая точка кривой отрицательного капиллярного давления	2,1%	2,8%	3,4%	3,5%

Как видно из таблицы, значения влажностей, при которых имеют место критические точки кривой скорости сушки, кривой отрицательного капиллярного давления, кривых зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности совпадают с точностью $\pm 3\%$.

Наши исследования показали, что величины влажностей, соответствующие первой критической точке кривой скорости сушки и первой критической точке кривой зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности совпадают с влажностью, соответствующей второй критической точке кривой отрицательного капиллярного давления, и что величина влажности, соответствующая второй критической точке кривой скорости сушки, совпадает с третьей критической точкой кривой отрицательного капиллярного давления. Установленная закономерность позволяет сделать следующие выводы: во-первых, критические точки кривой скорости сушки обусловлены не изменением физических свойств воды (свободная вода, адсорбционно-связанная вода), а изменением расположения ее внутри капиллярно-пористого тела; во-вторых, критические точки кривых зависимости коэффициентов влаго- и термовлагопроводности от влажности характеризуют изменение подвижности влаги (вода, пар), связанное с изменением капиллярного состояния влаги внутри капиллярно-пористого тела.

Опыты по изучению поля влажности и температуры внутри капиллярно-пористого тела, а также зависимости коэффициентов $k\gamma$ и δ от влажности приводят нас к следующему представлению о перемещении влаги внутри капиллярно-пористого тела при сушке в мягком режиме.

Все тело можно разбить на две зоны. Первая зона расположена сверху. Градиент в ней мал (менее $0,1\%$ влажности на 1 см), а температурный велик ($1,5$ — $1,7$ градусов на 1 см). Вторая зона находится под первой в глубине тела. Градиент влажности в ней велик, а температурный градиент почти отсутствует. Соотношение между высотами этих зон при влажности на поверхности меньшей, чем влажность, соответствующая второй критической точке кривой скорости сушки, практически не изменяется. Это соотношение зависит лишь от размера фракции песка. Как показали подсчеты, высота первой зоны обратно пропорциональна среднему радиусу зерна кварцевого песка.

Движение влаги в первой зоне в периоде постоянной скорости сушки происходит за счет разности капиллярных давлений на концах капилляров первой зоны (явление влагопроводности).

Градиент влажности незначительный, градиент температур большой. Коэффициент влагопроводности с уменьшением влажности убывает, коэффициент термовлагопроводности увеличивает-

ся. Первая критическая точка кривой скорости сушки наступает тогда, когда влажность на поверхности достигает величины, соответствующей второй критической точке кривой отрицательного капиллярного давления. Это соответствует концу капиллярного состояния и началу состояния заземленного воздуха. При этих влажностях имеет место минимум кривой зависимости коэффициента K_1 от влажности и максимум кривой зависимости коэффициента термовлагопроводности от влажности.

Начиная с величины влажности на поверхности, отвечающей первой критической точке кривой скорости сушки (начало периода падающей скорости сушки), движение влаги в виде жидкости затруднено. Оно сопровождается увеличением отрицательного капиллярного давления. Движение влаги к поверхности тела происходит, во-первых, за счет подсосывания ее капиллярами первой зоны вследствие различного капиллярного давления на их концах (влагопроводность); во-вторых, за счет испарения влаги внутри тела и движения ее в виде пара по открывшимся наибольшим капиллярам первой зоны. Градиент влажности в первой зоне незначительный. Коэффициент влагопроводности с уменьшением влажности медленно увеличивается. Явление термовлагопроводности способствует перемещению влаги в виде пара и жидкости к поверхности. Коэффициент термовлагопроводности убывает: влага движется не только в виде жидкости, но и в виде пара. Скорость сушки падает. Вторая критическая точка кривой скорости сушки наступает в тот момент, когда влажность на поверхности тела достигает величины, соответствующей третьей критической точке кривой отрицательного капиллярного давления, т. е., когда заканчивается состояние заземленного воздуха и начинается состояние заземленной влаги. К моменту наступления второй критической точки кривой скорости сушки распределение влаги внутри тела почти равномерно.

После второй критической точки кривой скорости сушки в поверхностной зоне появляется значительный градиент влажности; температурный градиент остается прежним, убывая к концу сушки. Движение влаги в виде жидкости невозможно, влага движется в виде пара по открывшимся капиллярам первой зоны. Скорость сушки резко убывает.

Такая картина движения влаги внутри капиллярно-пористого тела в процессе сушки соответствует теоретическим положениям, разработанным профессором А. В. Лыковым.

1. NH Geaglsk Drying granulare solids and Hougen Ind. Eng. Ch. 29, 7, 805, 1937.

2. А. П. Порхаев. Кинетика впитывания жидкости элементарными капиллярами и пористыми телами. Колл. Ж. XI. 6. 346, 1946.

