

## МЕХАНИЗМЫ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ВАКУУМНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ТЕЛА И ПРОПИТЫВАЮЩИЕ СОСТАВЫ

А.А. Грибанов

В настоящее время вопросы совершенствования технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве приобрели особое значение. Конкурентная борьба вынуждает производителей внедрять новые эффективные технологии, которые бы позволяли сокращать использование ресурсов, а также повышать производительность оборудования. Разработка таких технологий невозможна без нахождения новых физических принципов, лежащих в основе протекания технологических процессов, а также выявления способов интенсификации уже используемых технологий.

В основе многих технологических процессов, получивших широкое распространение на практике, лежат процессы тепло-массо-переноса в капиллярно-пористых телах. В первую очередь к процессам данной группы относят заполнение капилляров и пор специальными составами, а также удаление влаги из них. Существуют различные способы интенсификации этих процессов: повышение температуры, давления, созданием вакуума, использованием электростатических методов. Однако на современном этапе больший интерес представляет импульсно-вакуумная интенсификация рассматриваемых процессов.

В основе импульсно-вакуумной интенсификации лежит принцип создания глубокого вакуума за короткое время. Такой способ интенсификации позволяет существенно сократить время на реализацию процесса. Однако исследования показывают, что требуемый результат может быть достигнут не всегда.

Моделирование процессов тепло-массо-переноса в капиллярно-пористых телах при использовании импульсно-вакуумной интенсификации делает актуальной задачу учёта характеристик материалов, используемых как в качестве капиллярно-пористого тела, так и компонента, заполняющего его капилляры и поры. При использовании других способов интенсификации учёт этих параметров может считаться несущественным.

Следует заметить, что обычную вакуумную сушку при остаточном давлении в автоклаве  $p_{ост} > 150$  мм. рт. ст. можно, в первом приближении, представить как радиационно-

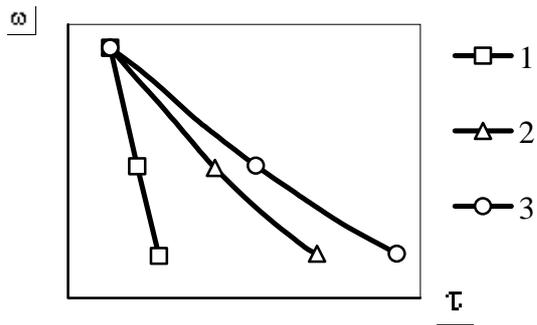
кондуктивную, причем в процессе вакуумирования степень радиационного механизма сушки должна возрастать из-за уменьшения поглощения излучения стенок автоклава, в котором осуществляется сушка, молекулами газа и пара, то есть механизм сушки с медленным, более 60 с, набором вакуума аналогичен механизму атмосферной сушки с конвекционным или радиационным подводом тепла и сопровождается релаксацией давления паров.

Проведенные исследования [1 – 4] показали, что быстрое создание градиента давления от атмосферного до 100-150 мм рт. ст. резко увеличивает удаление жидкости из обмотки. Интенсивный сброс давления не приводит, в отличие от обычной вакуумной сушки, к постепенной релаксации давления паров. Поэтому они переходят в перегретое состояние с температурой перегрева 65-70°C, что соответствует перегретому состоянию пара при температуре 150-170°C, то есть давлению порядка десяти атмосфер. При таких условиях происходит стремительное испарение жидкости с поверхности тела и её охлаждение до температуры, ниже температуры конденсации при данном давлении. Температура внутри капиллярно-пористого тела остаётся несколько выше поверхностной. Это приводит к тому, что образовавшиеся пары своим избыточным давлением выталкивают жидкость, сконденсировавшуюся на поверхности капиллярно-пористого тела в виде мелких капель, в объём газовой фазы.

Это можно хорошо проследить по кривым кинетики сушки, представленным на рисунке 1. Как видно из данного рисунка, временные границы второго участка для кривой 1 существенно сокращаются.

Количество испарившейся жидкости с поверхности капиллярно-пористого тела за счёт теплоты испарения при интенсивном изменении давления с предварительным нагревом до 70-100°C составляет не более 4-5% всей удаляемой жидкости. Остальное её количество выносится из капилляров и пор в виде мелкодисперсного потока без фазового перехода, то есть за счёт быстрого создания градиента давления.

# МЕХАНИЗМЫ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ВАКУУМНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ТЕЛА И ПРОПИТЫВАЮЩИЕ СОСТАВЫ



- 1 – изменение влагосодержания скоростным вакуумированием;
- 2 – изменение влагосодержания медленным набором вакуума;
- 3 – изменение влагосодержания в процессе сушки конвекцией

Рисунок 1 – Кривые кинетики сушки

Математическое представление описанного термовакуумного процесса сушки капиллярно-пористого тела рассмотрим далее.

В общем случае, аналитическая задача, устанавливающая связь между временными и пространственными изменениями потенциалов переноса при сушке влажных капиллярно-пористых материалов, формулируется на основе системы дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепло-массопереноса, являющейся математической моделью процессов переноса при сушке. В соответствии с [5 – 10], а также с учётом результатов выполненных О.И. Хомутовым и С.О. Хомутовым исследований в случае постоянных коэффициентов эта система уравнений примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \delta \cdot \nabla^2 t + D \cdot \nabla^2 u + \\ + D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left( a + \frac{E \cdot r \cdot D \cdot \delta}{c} \right) \cdot \nabla^2 t + \frac{E \cdot r}{c} \cdot D \cdot \nabla^2 u + \\ + \frac{E \cdot r}{c} \cdot D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} = - \frac{E}{c_B} \cdot D \cdot \delta \cdot \nabla^2 t - \frac{E}{c_B} \cdot D \cdot \nabla^2 u + \\ + \left( a_p - \frac{E}{c_B} \cdot D \cdot \delta_p \right) \cdot \nabla^2 p, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\delta_p = \frac{k_p}{D \cdot \rho_0}$  – относительный коэффициент фильтрационного потока парообразной влаги;

$$a_p = \frac{k_p}{c_B \cdot \rho_0} \text{ – коэффициент конвективной диффузии;}$$

ной диффузии;

$c$  – объёмная теплоёмкость;

$r$  – теплота физического превращения;

$\delta$  – термоградиентный коэффициент;

$$u = \frac{m}{m_0} \text{ – градиент относительной концентрации;}$$

центрации;

$m$  – масса жидкости в капиллярно-пористом теле, кг;

$m_0$  – масса капиллярно-пористого тела, кг;

$\tau$  – время, с;

$D$  – коэффициент диффузии;

$p$  – равновесное давление, Па;

$E$  – критерий фазового перехода, который определяется как отношение изменения концентрации влаги, вызванного фазовым переходом, к общему изменению концентрации влаги;

$k_p$  – коэффициент фильтрационного переноса среды;

$\rho_0$  – плотность капиллярно-пористого тела, кг/м<sup>3</sup>.

Упрощенное решение системы (1) при линейном характере сброса давления

$$p_c(\tau) = p_0 - e_p \cdot \tau, \quad t_c(\tau) = t_c - e_p \cdot \tau. \quad (2)$$

может быть получено на основе предположений:

– молекулярное слагаемое переноса вещества мало по сравнению с членом фазового перехода;

– за счёт только конвективного подвода тепла при ударном вакуумировании можно удалить из капиллярно-пористого тела, как уже отмечалось, незначительную часть связанного вещества от всей удаляемой массы.

Тогда решением (1) будут зависимости [1, 2, 11]:

$$T = \frac{(1 - \&) \cdot K_o \cdot Ra \cdot Lu_p^2 \cdot (1 - \lambda_p^*) \cdot Pd_p}{V^2} \times \quad (3)$$

$\times F(X, Fo);$

$$U = \frac{Ra \cdot Lu_p^2 \cdot (1 - \lambda_p^*) \cdot Pd_p}{V^2} \cdot F(X, Fo); \quad (4)$$

$$P = \frac{Lu_p \cdot Pd_p}{V} \cdot F(X, Fo); \quad (5)$$

$$F(X, Fo) = V \cdot Fo - \frac{1}{2} \cdot (1 - X^2) + \quad (6)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^3} \cdot f(\mu_n \cdot X) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}$$

где  $Ra = \frac{C_q \cdot C_B \cdot \Delta P}{\Delta U}$  – число Рамзина;

В выражениях (3) – (6) применены также следующие обозначения:

$$V = Lu_p \cdot [1 - (1 - \&) \cdot (1 - \lambda_p^*) \cdot (1 + Ko \cdot Ra \cdot Lu_p)]; \quad (7)$$

$$f(\mu_n \cdot X) = (-1)^{n+1} \cdot \cos(\mu_n \cdot X). \quad (8)$$

Из полученных решений видно, что между безразмерными потенциалами  $T, U, P$  существует определенная связь. Связь между безразмерной температурой и безразмерным потенциалом массосодержания имеет вид:

$$U = \frac{1}{(1 - \&) \cdot Ko} \cdot T. \quad (9)$$

В формуле (9) критерий  $Ko$  характеризует компоненты связанного вещества в капиллярах и порах.

Таким образом, зная физические параметры удаляемого компонента из капиллярно-пористого тела, критерий термомеханического увлечения и безразмерную температуру  $T$ , можно определить количество удаляемого компонента. И наоборот, зная количество удаленного компонента, безразмерную температуру, можно определить критерий  $\&$  и, значит, поток вещества, удаленного с помощью термомеханического увлечения в жидкой фазе.

Из решений математических моделей пропитки и сушки капиллярно-пористых тел следует, что безразмерный потенциал массосодержания прямо пропорционален безразмерным величинам температуры и давления, а, следовательно, скорости их изменения. Другими словами, за одинаковые промежутки времени безразмерная относительная концентрация больше изменится в том случае, в котором скорость изменения указанных величин выше. Однако создание значительного градиента температуры является технологически сложной задачей, тогда как скорость изменения давления обусловлена лишь быстроедействием используемых вакуумных задвижек.

Теперь рассмотрим особенности процесса тепломассопереноса при сушке с использованием импульсно-вакуумной интенсификации капиллярно-пористых тел, структура которых представлена микропорами. Заметим, что процесс тепломассопереноса на начальной стадии протекает так же, как и для предыдущего случая. Вследствие возникшей разности давлений происходит испарение воды. Если используется разогрев материала, то процесс парообразования протекает гораздо интенсивнее. При этом в капил-

лярах и порах возникает двухфазная пароводяная смесь. Сечение пор и капилляров настолько мало, что содержащаяся в нём смесь не может выйти к поверхности капиллярно-пористого тела. Вследствие этого давление пара будет возрастать. Величина его сильно зависит от размеров капилляра. При этом к стенкам капилляров будут прилагаться силы, показанные на рисунке 2.

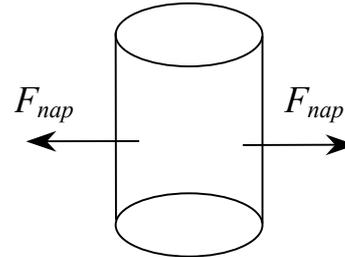


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на стенки капилляра при парообразовании заполняющей его жидкости

Усилия, прилагаемые к стенкам капилляра, можно оценить, зная ориентировочную величину давления, оказываемого паром на стенки. С точки зрения теории сопротивления материалов необходимо решить классическую задачу воздействия ударной нагрузки. При этом возникающие напряжения в материале зачастую превосходят значения допускаемого. В связи с этим наблюдается в том или ином виде разрушение материала. Для древесины, например, это выражается в расщеплении. Поэтому актуальной является задача отыскания таких режимов сушки влажных капиллярно-пористых материалов, при которых они не будут разрушаться. Поскольку механические характеристики материала индивидуальны, то целесообразным является выведение общей теоретической закономерности, благодаря которой можно было бы проводить расчёт.

Известно, что гидравлическое и аэродинамическое сопротивление в общем случае для прямолинейного трубопровода линейно зависит от длины трубопровода и его сечения. Поэтому, чем меньше сечение трубопровода и он длиннее, тем большее сопротивление оказывается проходящим газам и жидкостям. Если сечение трубопровода (размеры пор)  $s_{nop} \rightarrow 0$ , а его длина  $l_{nop} \rightarrow \infty$ , то гидравлическое сопротивление стремится бесконечно возрасти. Этим и обусловлен рост давления внутри капилляров и пор. В общем случае давление определяется как отношение силы к величине поверхности, на которую эта сила давит. В нашем случае более инте-

## МЕХАНИЗМЫ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ВАКУУМНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ТЕЛА И ПРОПИТЫВАЮЩИЕ СОСТАВЫ

ресным будет представление изменения давления и силы во времени в виде производных:

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{dF}{S \cdot d\tau}, \quad (10)$$

где  $S$  – площадь боковой поверхности капилляра, определяемая по формуле

$$S = 2 \cdot \sqrt{s_{\text{нор}}} \cdot \pi \cdot l_{\text{нор}}. \quad (11)$$

Поскольку проводимый расчёт является ориентировочным, то для упрощения решения задачи предположим, что действует сила растяжения на стержень сечения  $S$ . Формула (11) даёт возможность выразить искомую силу

$$dF = dP \cdot S. \quad (12)$$

В теории сопротивления материалов для того, чтобы оценить прочность материала необходимо сравнить напряжение в материале с допусаемым. В нашем случае имеет место ударная нагрузка на образец. Поэтому целесообразно для упрощения задачи и обеспечения понимания её сути сравнить изменение напряжения с допусаемым. Для толстостенной трубы решение классической задачи имеет вид

$$2P \leq [\sigma], \quad (13)$$

то есть изменение давления за установленную единицу времени не должно превышать половины допусаемого напряжения.

Используя эту упрощённую методику можно проводить оценку возможных повреждений капиллярно-пористого тела по ориентировочным данным о геометрических размерах пор и капилляров, а также механических характеристик материала.

В ходе проведения экспериментальных исследований пропитки обмоток электрических машин было замечено, что при создании вакуума за короткое время и большой глубины наблюдается явление вспенивания пропиточного состава. Это явление играет отрицательную роль. Качество пропитки вследствие образования дополнительных газовых включений в объёме затвердевшего лака или компаунда существенно снижается. Всё это делает актуальной задачу снижения влияния этого эффекта на основе исследования условий его возникновения и характера протекания.

Для решения этой задачи был выполнен комплекс экспериментальных исследований. Одним из наиболее существенных результатов стало объяснение механизма возникновения рассматриваемого явления. Пропиточный состав представляет собой смесь из двух компонентов. Один из них имеет высокую температуру кипения, а другой – низкую. При

нагревании смеси сперва начнётся процесс кипения компонента смеси, имеющего низкую температуру кипения, а затем другого компонента. Механизм образования изучаемого явления представляется в общих чертах следующим образом. В небольшом объёме исходного однородного пропиточного состава вследствие флуктуации плотности образуются мелкие включения паровой фазы в виде микроскопических паровых пузырьков компонента, с низкой температурой кипения. Пузырьки весьма малых размеров неустойчивы (нежизнеспособны). Эта неустойчивость объясняется тем, что при недостаточных размерах включений паровой фазы работа изменения объёма не может компенсировать энергетически невыгодный эффект появления поверхности раздела между жидкостью и газом (чем меньше размер пузырька, тем больше отношение его поверхности к объёму).

Как известно, при уменьшении давления имеет место эффект снижения температуры кипения, а следовательно и температуры перегрева жидкости. С ростом перегрева жидкости, с одной стороны, повышается вероятность возникновения относительно больших включений паровой фазы, с другой – уменьшается размер жизнеспособных пузырьков. Они оказываются устойчивыми, становятся центрами парообразования и продолжают расти.

Преимущественное испарение второго компонента в период роста парового пузыря снижает его концентрацию вблизи границы раздела фаз, что приводит к изменению свойств жидкости в пограничном слое, в частности к повышению температуры насыщения, так как в пограничном слое начинает преобладать высококипящий компонент. Следовательно, процесс испарения в паровой пузырь происходит при относительно пониженном перегреве по сравнению со смесью исходного состава, что затрудняет испарение и замедляет скорость роста парового пузыря.

Восстановление концентрации низкокипящего компонента в пограничном слое возможно лишь за счёт массообмена с основной массой жидкости среднего состава. Поскольку массообмен является следствием испарения, он происходит с запаздыванием по отношению к испарению в паровой пузырь и поэтому на границе пузыря в период его роста поддерживается пониженная концентрация низкокипящего компонента.

При резком снижении давления получается так, что растворитель испаряется в паровые пузыри по всему объёму пропиточного

состава. За счёт разности давлений в жидкости и за её пределами на паровые пузыри действует выталкивающая сила. При этом все пузыри стремятся покинуть пределы пропиточного состава. Одновременность этого действия делает процесс взрывообразным. Поэтому и наблюдается вспенивание.

Экспериментальные исследования показали, что существует зона перехода от режи-

ма свободной конвекции (испарения растворителя) к режиму вспенивания. В результате обработки экспериментальных данных были получены значения лежащие в этой зоне перехода. Наиболее вероятные значения давления, при котором происходит переход, в зависимости от скорости создания вакуума и массовой доли растворителя приведены на рисунке 3.

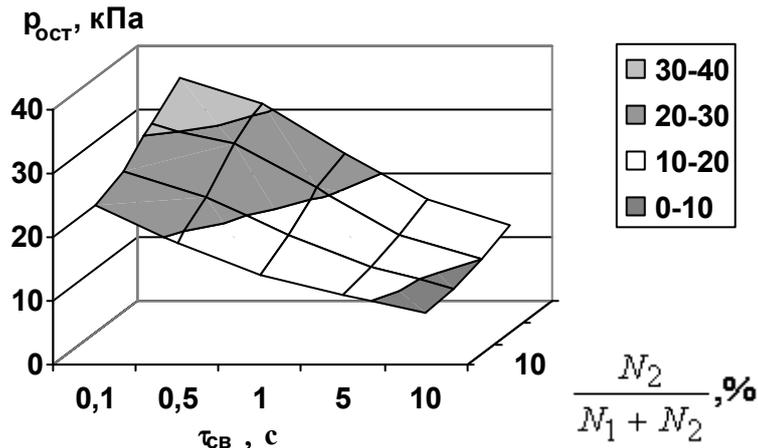


Рисунок 3 – Зависимость давления от скорости создания вакуума и массовой доли растворителя при переходе от свободной конвекции к вспениванию

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления: Отчет о НИР (заключит.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова; Руководитель О.И. Хомутов. – № ГР 01970000744; Инв. № 02990001280. – Барнаул, 1999. – 221 с.
2. Хомутов, О. И. Эксплуатация, диагностика и ремонт изоляции электрических машин: Учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / О.И. Хомутов, В.И. Сташко, С.О. Хомутов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – 146 с.
3. Куц, П.С. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции [Текст] / П.С. Куц, И.Ф. Пикус. – Минск : Наука и техника, 1979. – 296 с.
4. Хомутов, С.О. Исследование зависимости качества пропитки и сушки изоляции от скорости изменения давления [Текст] / С.О. Хомутов, В.В. Крайнев, Д.А. Мананников, О.И. Хомутов // Научно-техническое творчество студентов: Сборник тезисов докладов 56-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского государственного технического университета, посвященная 270-летию со дня рождения И.И. Ползунова. Часть 1 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 137.
5. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
6. Куц, П. С. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции [Текст] / П.С. Куц, И.Ф. Пикус. – Минск : Наука и техника, 1979. – 296 с.
7. Рашковская, Н. Б. Сушка в химической промышленности [текст] / Н.Б. Рашковская. – М.: Химия, 1977. – 138 с.
8. Куц, П. С. Аналитическое исследование тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах в условиях вакуума [Текст] / П.С. Куц, И.Ф. Пикус, В.Д. Кононенко. – Минск : Институт теплообмена АН БССР, 1976. – 85 с.
9. Куц, П. С. Исследования влияния режима и варианта сушильного процесса на интенсивность сушки и качество. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / П.С. Куц. – Минск, 1964. – 175 с.
10. Куц, П. С. Научные основы кинетики технологии и техники сушки микробиологических материалов. дис. ... докт. техн. наук [Текст] / П.С. Куц. – Минск, 1979. – 439 с.
11. Хомутов, С.О. Теоретические исследования процессов сушки изоляции обмоток электрических машин и предпосылки к повышению их эффективности [Текст] / С.О. Хомутов, О.И. Хомутов // Наука, техника, образование: Межвузовский сборник научных трудов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 11-17.