

УДК 666.3-127:621.3.014

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЕНОТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРОТЕПЛОСИЛОВОГО ПОЛЯ. Часть 3. Исследование процессов тепло- и массопереноса в пеносистеме при воздействии ЭГТСП\*

В результате температурного расширения в пеномассе газовой фазы, выступающей в роли уплотняющего компонента в замкнутом объеме, генерируется избыточное внутреннее давление и образуются поля давлений, температур и влагосодержания. Частные потоки жидкости, возникающие от этих полей, направлены из центра к перфорированным стенкам формы с удалением за ее пределы. В ЭГТСП возникают три частных потока влаги, составляющих единый поток в массе. Таким образом, самоуплотнение сопровождается процессами тепло- и массопереноса. При низких температурах влага движется в материале в виде жидкости, а при высоких — в виде пара. Плотность суммарного потока влаги можно представить как сумму плотностей частных потоков. Аналитическое исследование механизма тепло- и массообменных потоков позволяет проанализировать поведение пеномассы в ходе теплосиловой обработки и выбрать для нее наилучшие условия.

**Ключевые слова:** тепло- и массоперенос, электрогидротеплосиловое поле (ЭГТСП), фильтрационные потоки влаги, напряженное состояние, парогазовая смесь, градиент влагосодержания, потенциалы переноса теплоты и влаги, термовлагопроводность, потенциал массопереноса.

**З**акономерности образования избыточного давления при электропрогреве в пеносистеме, находящейся в замкнутом перфорированном объеме, изучали аналитически и экспериментально. Установлено, что на формирование поля давлений в пеномассе (напряженного состояния) влияет температурный фактор, определяющий тепловое расширение газовой, жидкой и твердой фаз, а следовательно, и скорость роста давления, развиваемого в системе. Вторым фактором влияния является величина и направление фильтрационных потоков влаги, определяющих скорость релаксации давления в объеме.

Подключение пеномассы как активного сопротивления в цепи переменного тока ведет к интенсификации протекающих в материале процессов как на макро-, так и на субмолекулярном уровне. Введение электрического переменного

тока в пеносистему влияет на поведение носителей электрического заряда — ионов и диполей диффузного слоя. При движении (колебании) носителей зарядов выделяется тепло, из-за чего увеличивается кинетическая энергия как во всем объеме, так и на поверхностях раздела фаз. Значительное влияние оказывают возникающие напряженного состояния от самоуплотнения пеномассы и его динамика изменения.

При обработке пеномассы в ЭГТСП можно выделить три вида переноса вещества: перемещение смеси в области с меньшим давлением, перенос влаги в виде жидкости и фильтрацию паровоздушной смеси по порам и капиллярам. Массоперенос в области с меньшим давлением зависит от реологических характеристик пеномассы, объемной концентрации газовой составляющей и возникающих градиентов. Однако этот вид массопереноса не является преобладающим. Перенос вещества в форме парогазовой смеси также не является преимущественным, так как обработка осуществляется при температуре ниже 60 °С, когда пар в капиллярах и порах присутствует в состоянии равновесной влажности. Эксперимент показал, что разогрев происходит неравномерно по сечению изделия. Создается перепад температур  $t$  и влагосодержаний  $U$  между центром массы (ц. м) и ее периферией (п. м):  $t_{ц.м} > t_{п.м}$ ,  $U_{ц.м} < U_{п.м}$ , т. е.  $\Delta t = t_{ц.м} - t_{п.м}$ ,  $\Delta U = U_{п.м} - U_{ц.м}$ .

\* Части 1 и 2 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 5 и 7 за 2020 г.



В. Н. Соков  
E-mail: sersok\_07@mail.ru

Представим на рисунке созданный перепад температур в виде изотермических поверхностей по сечению модельного куба. Для них можно записать, что  $t_{ц.м} > (t + \Delta t) > t > (t - \Delta t) > t_{п.м}$ . Представим также созданный перепад влагосодержаний в виде изолиний влажности:  $U_{ц.м} < (U - \Delta U) < (U + \Delta U) < U_{п.м}$ . Изменение потенциала наблюдается в направлении, пересекающем изопотенциальные поверхности.

Наибольшее изменение наблюдается в направлении нормали  $n$  к изопотенциальным поверхностям. Температурный градиент — предел отношения кинетики температуры к расстоянию между изотермами по нормали:  $\nabla T = \lim_{n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right)$ , градиент влагосодержания:  $\nabla U = \lim_{n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta U}{\Delta n} \right)$ ;  $\nabla T$

и  $\nabla U$  являются, соответственно, градиентами потенциалов переноса теплоты и влаги и выражаются векторными величинами. Их положительным направлением принято считать направление, идущее в сторону возрастания потенциалов;  $\nabla T$  и  $\nabla U$  вызывают поток теплоты  $q^B$  и поток влаги  $q^B$  в направлении, противоположном градиентам потенциалов переноса теплоты и влаги.

Вместе с удельным потоком теплоты возникает еще и поток влаги, названный термовлагопроводностью (см. рисунок, 2). Этот поток влаги  $q_{mt}^B$  так же, как и  $q_{mu}^B$ , входит как одна из частных составляющих в общий удельный поток массы и является векторной величиной, направленной противоположно вектору градиента температур.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что внутри пеномассы при теплосиловой обработке в ходе нагрева возникает давление, встречающее реакционное воздействие стенок замкнутой формы. Так как в такой форме в начальный период электропрогрева внутреннее давление в форме больше, чем давление периферийных слоев, между центральными слоями пеномассы и ее поверхностью (находящейся в соприкосновении с гранями замкнутой перфорированной формы) создается перепад давлений  $\Delta P$ . Разность давлений частных потоков  $q_{mu}^B$  и  $q_{mt}^B$  приводит к появлению частного потока влаги в материале от давления  $q_{mp}^B$ . Таким образом, в период электропрогрева пеномассы в замкнутой перфорированной форме при подъеме температуры возникают три частных потока влаги  $q_{mu}^B$ ,  $q_{mt}^B$  и  $q_{mp}^B$ , составляющие единый поток влаги в материале  $q_m^B$ .

Таким образом, самоуплотнение при электрогидротеплосиловой обработке пеносистемы сопровождается процессами тепло- и массопереноса. Основной задачей внутреннего тепло- и массопереноса при электрогидротеплосиловой обработке является определение удельных потоков теплоты и массы. Удельный поток теплоты внутрь материала  $q_t^B$  от нагретых внутренних слоев описывается уравнением

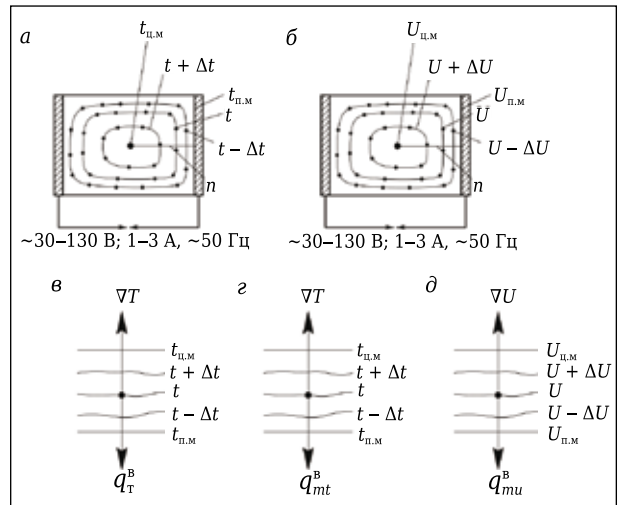


Схема возникновения в формовочной смеси градиентов температур и влагосодержаний: а, б — линии изопотенциальных поверхностей температур  $t$  и влагосодержаний  $U$  соответственно; в — схема образования градиента температур  $\nabla T$  и потока теплоты  $q_t^B$ ; г — схема образования частного потока массы  $q_{mt}^B$  за счет термовлагопроводности; д — схема образования градиента влагосодержания  $\nabla U$  и частного потока массы  $q_{mu}^B$ ;  $n$  — нормаль

$$q_t^B = -\lambda \nabla T + i q_m^B, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность влажного материала;  $\nabla T$  — градиент температуры;  $i$  — теплота, перемещающаяся в материале с удельным потоком массы;  $q_m^B$  — плотность удельного потока массы, перемещающейся в материале.

Три частных потока влаги  $q_{mu}^B$ ,  $q_{mt}^B$  и  $q_{mp}^B$ , представляют собой следующие выражения:

$$q_{mu}^B = -\frac{\lambda_m}{C_m \rho_0} \rho_0 \nabla U = -a_m \rho_0 \nabla U. \quad (2)$$

Полученный коэффициент  $\frac{\lambda_m}{C_m \rho_0} = a_m$  по физическому смыслу является аналогом температуропроводности  $a = \lambda / C \rho_0$ . Поэтому  $a_m$  называют коэффициентом потенциалопроводности. По физическому смыслу  $a_m$  — величина, характеризующая скорость выравнивания влагосодержания в теле материала. Наличие градиента температуры вызывает в материале перемещение влаги в направлении теплового потока, т. е. термовлагопроводность:

$$q_{mt}^B = \frac{\lambda_m}{C_m \rho_0} \rho_0 C_m \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{up} \nabla T = a_m \rho_0 \delta \nabla T, \quad (3)$$

где  $C_m$  — термоградиентный коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент потенциалопроводности  $a_m$  (отношения перепада влагосодержаний к перепаду температур),  $C_m \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{up} = \delta$ .

Согласно закону Дарси фильтрационный поток влажного воздуха через пористое тело равен  $q_{mt}^B = -K \nabla P$  ( $K$  — коэффициент воздухопроницаемости). Тогда

$$q_{mp}^b = -a_m \rho_0 \delta_p \nabla P = -a_p \nabla P, \quad (4)$$

где  $C_m \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{uT} = \delta_p$  — коэффициент, учитывающий влияние на  $a_m$  отношения изменения массопереноса к перепаду давления;  $C_m \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_T$  — удельная влагоемкость при конкретной температуре;  $\theta$  — потенциал массопереноса.

При низких температурах, когда влага движется по материалу в виде жидкости,  $a_p$  характеризует влагопроницаемость материала под действием избыточного давления. При высоких температурах, когда влага движется в виде пара (молярный перенос), коэффициент характеризует паропроницаемость материала.

Общее уравнение плотности суммарного потока массы в материале  $q_m^b$  можно представить как сумму плотностей частных потоков  $q_{mu}^b$ ,  $q_{mt}^b$ ,  $q_{mp}^b$ .

$$q_m^b = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_p \nabla P = -a_m \rho_0 (\nabla U + \nabla T + \nabla P), \quad (5)$$

где  $q_m^b$  — плотность потока массы, перемещающейся внутри материала в единицу времени через единицу поверхности;  $a_m$  — коэффициент потенциалопроводности;  $\rho_0$  — плотность абсолютно сухого материала; значения коэффициентов  $\delta$  и  $\delta_p$  рассчитываются по формулам (3) и (4);

$\nabla U$ ,  $\nabla T$  и  $\nabla P$  — соответственно градиенты влагосодержания, температуры и давления.

Определив плотность потока массы  $q_m^b$  и подставив ее в уравнение (1), получим уравнение, определяющее распространение теплоты в теле при наличии массообмена:

$$q_t^b = -\lambda \nabla T + i q_m^b = -\lambda \nabla T + (-i_u a_m \rho_0 \nabla U - i_t a_m \rho_0 \nabla T - i_p a_m \rho_0 \delta_p \nabla P), \quad (6)$$

где  $i_u$ ,  $i_t$  и  $i_p$  — количество теплоты, перемещающейся с потоками массы за счет градиентов соответственно влагосодержания, температуры и давления.

Решение уравнений (5) и (6) требует для определения коэффициентов  $a_m$ ,  $\delta$  и  $\delta_p$  экспериментальных исследований, что представляет значительные трудности. Аналитическое исследование механизма тепло- и массообменных потоков, проведенное по этим уравнениям, позволяет проанализировать поведение материала в ходе теплосиловой обработки и выбрать для нее наилучшие условия. Все эти закономерности, касающиеся внутреннего тепло- и массопереноса, могут быть представлены графически. ■

Получено 26.04.20  
© В. Н. Соков, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

35<sup>th</sup> Assembly  
European Advanced Materials Congress  
22 - 24 March 2021 | Stockholm, Sweden

JOIN US IN THE  
**CITY OF NOBEL**  
STOCKHOLM, SWEDEN

<https://www.advancedmaterialscongress.org/oct20/>