

В. А. Похольченко, А. А. Иваней, А. С. Никонова, А. В. Кайченев

## Совершенствование системы охлаждения абсорбционной установки

Рассмотрены вопросы совершенствования системы охлаждения абсорбционной установки для получения высококачественной коптильной жидкости. Представлено описание абсорбционной установки, включающей абсорбер, теплообменник, низкотемпературную камеру, излучатель ультразвуковых колебаний, генератор водного аэрозоля. Представлены сведения о зависимости цветности экспериментальной коптильной жидкости от основных влияющих факторов процесса: температуры хладоносителя и количества сжигаемого топлива. Удельная поверхность топлива и массовая доля воды в топливе определялась по стандартным методикам; прозрачность, цвет и интенсивность окрашивания коптильной жидкости – органолептическим методом. Соответствие коптильной жидкости требованиям действующей нормативной документации по показателям безопасности проверялось стандартными методами определения содержания бенз(а)пирена, фенольных соединений, тяжелых металлов. Предложено уравнение для определения комплексного критерия качества экспериментальной коптильной жидкости на основе показателей ее химического состава. Указаны основные факторы, влияющие на величину совокупного параметра качества экспериментальной коптильной жидкости: уровень звукового давления колебаний, количество сжигаемого топлива, площадь теплообменной поверхности, температура хладоносителя, производительность ультразвукового генератора водного аэрозоля. В результате обработки экспериментальных данных разработано уравнение регрессии процесса получения коптильной жидкости абсорбцией. Путем математического моделирования процесса абсорбции коптильных компонентов дымовой среды мелкодисперсным аэрозолем определены рациональные параметры для процесса получения коптильной жидкости. Разработан проект технологической инструкции по производству коптильной жидкости из дымовой среды и акустически генерируемого аэрозоля. Разработан проект технических условий "Коптильная жидкость AntonioSilver" с апробацией на выпуске партии ароматизированной солено-сушеной продукции из гидробионтов (снеков).

**Ключевые слова:** система охлаждения, абсорбционная установка, коптильная жидкость, ультразвук, водный аэрозоль, теплообменник.

### Введение

Обеспечение населения России качественными безопасными пищевыми продуктами является стратегической целью развития отечественной пищевой промышленности. Исследования, направленные на разработку способов получения безопасных и эффективных в технологическом отношении бездымных коптильных сред (БКС), могут быть отнесены к ряду приоритетных направлений развития отечественной пищевой промышленности.

В процессе получения большого класса БКС происходит абсорбция либо адсорбция коптильных компонентов древесного дыма раствором жидкости или твердым поглотителем. В данной статье рассматривается вопрос совершенствования системы охлаждения абсорбционной установки для получения коптильной жидкости путем коагуляции частиц аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль", получаемой в результате взаимодействия потоков дымовой среды и акустически генерируемого водного аэрозоля.

### Материалы и методы

Конструктивно установка для получения коптильной жидкости состоит из абсорбера полезным объемом 400 дм<sup>3</sup>; теплообменника, максимальная площадь теплообменной поверхности которого составляет 2,00 м<sup>2</sup>; холодильной камеры с установленным внутри резервуаром объемом 110 л с хладоносителем (пропиленгликоль); ультразвукового генератора водного аэрозоля, среднее значение масс-медианного аэродинамического диаметра частиц которого составляет 4 мкм; излучателя ультразвуковых колебаний в диапазоне частот от 20 до 70 кГц при уровне звукового давления 120, 130, 135, 140 и 155 дБ [1–3].

Коптильную жидкость получают путем отвода теплоты от исследуемой аэродисперсной системы и направленного распространения ультразвуковых колебаний во внутреннее пространство абсорбера. За счет отвода теплоты от системы интенсифицировались процессы конденсации пересыщенных паров дисперсной фазы дымовых газов и абсорбции коптильных компонентов дымовой среды мелкодисперсной водой. Озвучивание исследуемой аэродисперсной системы стимулирует более эффективное протекание процессов абсорбции коптильных компонентов дымовой среды мелкодисперсной водой, а также процессов коагуляции частиц.

Абсорбер представляет собой прямоугольный корпус из нержавеющей стали, с противоположных сторон корпуса которого расположены патрубки для подачи и отвода дымовой среды. В средней части аппарата приварен патрубок подачи аэрозоля, в нижней – вентиль для отвода жидкости, скапливающейся в устройстве.

Система охлаждения включает в себя резервуар с хладоносителем, теплообменник, низкотемпературную камеру. Для обеспечения необходимой циркуляции хладоносителя (ХН) по охлаждающему контуру в него вмонтирован циркуляционный насос, электродвигатель которого снабжен векторным преобразователем частоты вращения, позволяющим плавно регулировать расход ХН. Змеевик теплообменника состоит из трех модулей, сконструированных из медной отоженной трубки, закрученной спирально, площадь каждого модуля составляет  $0,67 \text{ м}^2$ . Техническое исполнение теплообменника позволяет варьировать площадь теплообменной поверхности (ТОП) от  $0,67$  до  $2,00 \text{ м}^2$  с шагом  $0,67 \text{ м}^2$ . Для отвода теплоты при конденсации аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль", а также избыточного тепла, выделяющегося в процессе абсорбции копильных компонентов дымовых газов мелкодисперсной водой, в ходе экспериментов осуществлялась циркуляция по контуру охлаждения ХН. Для интенсификации процессов абсорбции и коагуляции осуществляется распространение во внутреннее пространство корпуса абсорбера ультразвуковых колебаний.

В ходе работы по исследованию влияния параметров, характеризующих отвод тепла от аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль", на интенсивность протекания процессов абсорбции копильных компонентов дыма частицами мелкодисперсного аэрозоля были проведены серии экспериментов по получению копильной жидкости AtonioSilver (AS) при разных условиях. Применялся ИК-дымогенератор повышенной производительности [4].

Совокупную оценку качества копильной жидкости проводили, учитывая химический состав жидкости, изменение свойств жидкости с течением времени, органолептические и физико-химические параметры продукта, обработанного в среде данной копильной жидкости. Вопрос обеспечения безопасности копильного агента для здоровья человека, т. е. отсутствия его составе канцерогенных соединений и веществ, вызывающих гигиеническую тревогу (ПАУ, НА и др.), имеет первостепенное значение при формировании совокупного параметра качества копильной среды. Копильная жидкость AS производится на основе "технологического" дыма, полученного в дымогенераторах инфракрасным энергоподводом при температуре пиролиза ниже  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , т. е. при температурах ниже критических, способствующих образованию канцерогенных соединений. Копильная жидкость AS неоднократно была подвергнута испытаниям на соответствие требованиям СанПиН 2.3.2.1293–2003<sup>1</sup> по показателям безопасности в ФГУ "Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Мурманской области". Исследования показали полное соответствие копильной жидкости AS требованиям указанного нормативного документа.

Совокупный параметр качества экспериментальной копильной жидкости AS рассчитывался исходя из содержания фенольных, карбонильных соединений, кислот. Ведущими специалистами в области копчения высказывается мнение, что количественная роль фракции фенолов в придании продукту специфических свойств копчености трактуется в количественном отношении как 66 %, карбонильных соединений – 14 %, кислот – 10 %, также 10 % – результат влияния других классов соединений дыма [5–7]. Были приняты следующие коэффициенты значимости для ведущих групп химических соединений разрабатываемой копильной жидкости: фракция фенольных соединений (ФС, %) – 0,37; фракция карбонильных соединений (КС, %) – 0,5; кислоты (К, %) – 0,13.

Совокупный параметр качества копильной жидкости был выражен через приведенную сумму копильных компонентов, которая рассчитывалась с учетом коэффициентов значимости для ведущих групп химических соединений экспериментальной копильной жидкости по формуле

$$Y = \text{ФС} \cdot 0,37 + \text{КС} \cdot 0,5 + \text{К} \cdot 0,13. \quad (1)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что на величину совокупного параметра качества копильной жидкости AS оказывают влияние следующие факторы: уровень звукового давления колебаний, воздействующих на изучаемую аэродисперсную систему  $n$ , дБ; количество сжигаемого топлива  $m$ , кг/ч; площадь поверхности охладителя  $S$ ,  $\text{м}^2$ ; температура хладоносителя  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ; производительность генератора аэрозоля  $p$ , г/ч.

Зависимость совокупного параметра качества от влияющих факторов может быть выражена функцией

$$Y = f(n, t, S, m, p). \quad (2)$$

При отсутствии озвучивания исследуемой аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль", постоянной производительности генератора аэрозоля и фиксированной площади теплообменной поверхности возможна постановка двухфакторного эксперимента, т. е.

$$Y = f(t, m). \quad (3)$$

<sup>1</sup> О введении в действие Санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.3.2.1293–03 (вместе с СанПиН 2.3.2.1293–03. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования по применению пищевых добавок. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы, утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 18.04.2003) : постановление Гл. гос. санит. врача Рос. Федерации от 18 апр. 2003 г. № 59 : ред. от 23 дек. 2010 г. : зарегистрировано в Минюсте Рос. Федерации 2 июня 2003 г. № 4613. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=111290>.

Процесс абсорбции копильных компонентов аэрозолем математически может быть описан уравнением, связывающим функцию отклика с факторами, влияющими на массообмен в изучаемой аэродисперсной системе. В качестве функции отклика выбран совокупный параметр качества копильной жидкости, учитываемый через приведенную сумму копильных компонентов (1).

При рассматриваемом математическом моделировании процесса абсорбции при получении копильной жидкости осуществлялась постановка двухфакторных экспериментов по следующей совокупности влияющих факторов: температура ХН, циркулирующего в системе охлаждения, количество топлива, сжигаемого в единицу времени.

Определение рациональных параметров процесса абсорбции осуществляли путем построения ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка, подобный метод позволяет сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, при числе влияющих факторов  $n = 2$  полный квадратичный полином имеет следующий вид:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2. \quad (4)$$

В качестве влияющих факторов принимали  $X_1$  – температуру ХН, циркулирующего в системе охлаждения,  $t$ , °С;  $X_2$  – количество сжигаемого топлива в единицу времени,  $m$ , кг/ч. Область факторного пространства ограничивалась следующими значениями влияющих факторов: по  $X_1$  – от 1 до 5 кг/ч, шаг 2 кг/ч, по  $X_2$  – от плюс 4 до минус 26 °С, шаг 15 °С. Прочие влияющие факторы, а именно: уровень звукового давления УЗ-колебаний, распространяемых во внутреннее пространство камеры смешения, влажность древесного сырья и его удельная поверхность, производительность генератора водного аэрозоля – поддерживались на постоянном уровне в ходе указанной серии экспериментов с целью исключить их влияние на результат и были изъяты из зависимости (2). В данной серии экспериментов озвучивание аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль" не производилось, влажность древесного сырья составляла  $70,0 \pm 5,0$  %, удельная поверхность сжигаемого топлива – от 7,0 до  $10,0 \pm 0,5$  м<sup>2</sup>/кг, производительность генератора водного аэрозоля – 850 г/ч.

### Результаты и обсуждение

В зависимости от выбранных условий абсорбции образцы копильной жидкости характеризуются разной интенсивностью окраски и степенью выраженности дымного аромата. Результаты анализов копильной жидкости на физико-химические параметры показывают, что сенсорные характеристики экспериментальной жидкости коррелируют со степенью ее насыщенности копильными компонентами дымовой среды [3]. В отсутствие отвода теплоты от изучаемой аэродисперсной системы образцы получаемой экспериментальной копильной жидкости представляют собой прозрачную бледно-желтую жидкость, аромат копчености едва уловим. Внешний вид образцов жидкости AS при варьировании количества сжигаемого топлива от 1 до 3 кг/ч (соответственно образцы 1, 2, 3) иллюстрирует рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид образцов экспериментальной копильной жидкости AS  
Fig. 1. Appearance of samples of experimental AS liquid smoke

После подключения первого модуля охладителя, площадь теплообменной поверхности которого составляла 0,67 м<sup>2</sup>, были получены образцы копильной жидкости, характеризующиеся более интенсивным дымным ароматом, который проявляется тем более явно, чем большее количество топлива сжигалось в единицу времени и чем ниже была температура применяемого ХН. На рис. 2 представлен внешний вид образцов копильной жидкости, цветность которых изменяется в ряду от бледно-соломенного до насыщенно-желтого. Температура ХН в системе охлаждения составляла плюс 4 °С, количество сжигаемого топлива варьировалось от 1 до 6 кг/ч (соответственно образцы 1–6).



Рис. 2. Внешний вид образцов копильной жидкости AS  
Fig. 2. Appearance of samples of AS liquid smoke

При вводе в эксплуатацию второго и третьего модулей охлаждения степень выраженности аромата копчености, а также насыщенность цвета образцов экспериментальной жидкости возрастала. При общей площади теплообменной поверхности  $1,34 \text{ м}^2$  цветность образцов изменяется в ряду от светло-желтого через лимонный и рыжеватый до светло-коричневого. При площади теплообменной поверхности  $2,00 \text{ м}^2$  цветность образцов изменяется от желтовато-рыжего через желтый, насыщенно-желтый и рыжий до коричневого. Данный факт иллюстрирует рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образцов копильной жидкости AS:  
*a* – площадь ТОП  $1,34 \text{ м}^2$ ; *b* – площадь ТОП  $2,00 \text{ м}^2$   
 Fig. 3. Appearance of samples of AS liquid smoke:  
*a* – the HTS area –  $1.34 \text{ м}^2$ ; *b* – the HTS area –  $2.00 \text{ м}^2$

Внешний вид характерных образцов копильной жидкости в случае применения ХН с температурой минус  $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$  при варьировании площади теплообменной поверхности и количества сжигаемого топлива представлен на рис. 4.

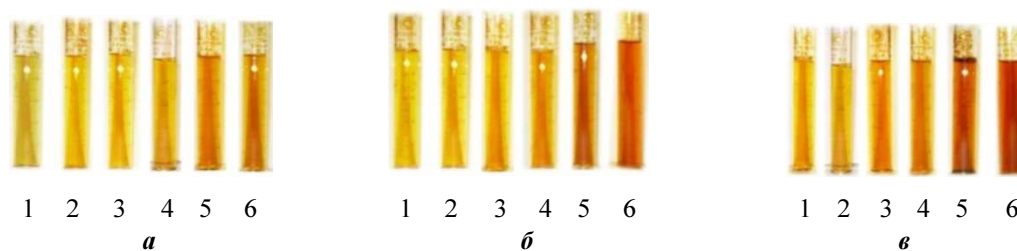


Рис. 4. Внешний вид образцов копильной жидкости AS:  
*a* – площадь ТОП  $0,67 \text{ м}^2$ ; *b* – площадь ТОП  $1,34 \text{ м}^2$ ; *c* – площадь ТОП  $2,00 \text{ м}^2$   
 Fig. 4. Appearance of samples of AS liquid smoke:  
*a* – the HTS area –  $0.67 \text{ м}^2$ ; *b* – the HTS area –  $1.34 \text{ м}^2$ ; *c* – the HTS area –  $2.00 \text{ м}^2$

Цветность образцов копильной жидкости в ситуации температуры ХН минус  $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от площади теплообменной поверхности при варьировании количества сжигаемого топлива от 1 до 6 кг/ч меняется от светло-лимонного через насыщенно-лимонный к светло-рыжему до светло-коричневого (при площади теплообмена  $0,67 \text{ м}^2$ ); от лимонного через насыщенно-желтый и рыжий к насыщенно-рыжему (при площади теплообмена  $1,34 \text{ м}^2$ ) либо от желтого через рыжий к вишневому (при площади теплообмена  $2,00 \text{ м}^2$ ).

При применении в качестве ХН жидкости с температурой минус  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  площадь теплообменной поверхности варьировалась в ряду от  $0,67$  до  $1,34 \text{ м}^2$  с шагом  $0,67 \text{ м}^2$ , количество сжигаемого топлива в единицу времени – в ряду от 1 до 6 кг/ч с шагом 1 кг/ч. Внешний вид характерных образцов экспериментальной копильной жидкости, полученных в упомянутых условиях, приведен на рис. 5.

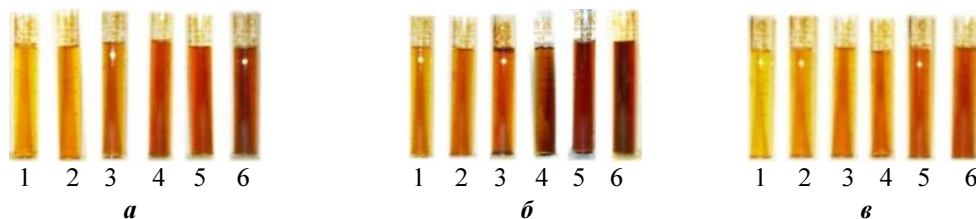


Рис. 5. Внешний вид образцов копильной жидкости AS:  
*a* – площадь ТОП  $0,67 \text{ м}^2$ ; *b* – площадь ТОП  $1,34 \text{ м}^2$ ; *c* – площадь ТОП  $2,00 \text{ м}^2$   
 Fig. 5. Appearance of samples of AS liquid smoke:  
*a* – the HTS area –  $0.67 \text{ м}^2$ ; *b* – the HTS area –  $1.34 \text{ м}^2$ ; *c* – the HTS area –  $2.00 \text{ м}^2$

При увеличении площади теплообменной поверхности в рассматриваемом диапазоне цвет характерных образцов жидкости становится более насыщенным. В случае сжигания 1 кг/ч топлива цветность образцов меняется от светло-лимонного ( $0,67 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *а*, образец 1) через желтый ( $1,34 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *б*, образец 1) к светло-рыжему ( $2,00 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *в*, образец 1). При сжигании 3 кг/ч топлива окраска образцов меняется от рыжего ( $0,67 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *а*, образец 3) через насыщенно-рыжий ( $1,34 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *б*, образец 3) к вишневому ( $2,00 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *в*, образец 3). В ситуации сжигания 6 кг/ч образцы изменяют цвет от насыщенно-рыжего ( $0,67 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *а*, образец 6) через вишневый ( $1,34 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *б*, образец 6) к насыщенно-вишневому ( $2,00 \text{ м}^2$ ) (рис. 5, *в*, образец 6). Очевидно повышение степени насыщенности цвета характерных образцов копильной жидкости при увеличении количества сжигаемого топлива в случае фиксированной площади охлаждаемой поверхности (рис. 5, *а*, *б*, *в*, при переходе от образца 1 к образцу 6).

Внешний вид характерных образцов экспериментальной копильной жидкости в случае применения в качестве ХН жидкости с температурой минус  $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$  при варьировании площади теплообменной поверхности в ряду от  $0,67$  до  $1,34 \text{ м}^2$  с шагом  $0,67 \text{ м}^2$  и изменении количества сжигаемого топлива в единицу времени в ряду от 1 до 6 кг/ч с шагом 1 кг/ч представлен на рис. 6.

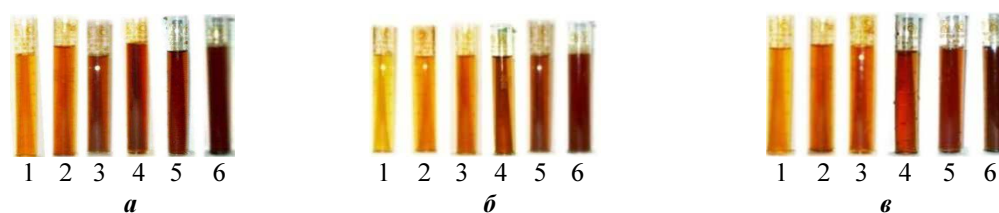


Рис. 6. Внешний вид образцов копильной жидкости AS:  
*а* – площадь ТОП  $0,67 \text{ м}^2$ ; *б* – площадь ТОП  $1,34 \text{ м}^2$ ; *в* – площадь ТОП  $2,00 \text{ м}^2$   
Fig. 6. Appearance of samples of AS liquid smoke:  
*а* – the HTS area –  $0.67 \text{ м}^2$ ; *б* – the HTS area –  $1.34 \text{ м}^2$ ; *с* – the HTS area –  $2.00 \text{ м}^2$

С увеличением количества отводимого тепла от аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль" насыщенность цвета характерных образцов экспериментальной копильной жидкости возрастает. Так, при количестве сжигаемого топлива 1 кг/ч при площади охлаждающей поверхности  $0,67 \text{ м}^2$  характерный образец экспериментальной жидкости имеет светло-лимонный оттенок, при площади  $1,34 \text{ м}^2$  – желтый, при площади  $2,00 \text{ м}^2$  – насыщенно-желтый; при количестве сжигаемого топлива 4 кг/ч соответственно: светло-коричневый ( $0,67 \text{ м}^2$ ), насыщенно-вишневый ( $1,34 \text{ м}^2$ ) и темно-вишневый ( $2,00 \text{ м}^2$ ).

При сжигании топлива в количестве 6 кг/ч при увеличении количества отводимой теплоты в связи в изменением площади теплообменной поверхности от  $0,67$  до  $2,00 \text{ м}^2$  с шагом  $0,67 \text{ м}^2$  цветность характерных образцов жидкости варьировалась от насыщенно-вишневого до темно-вишневого. Прослеживается тенденция повышения концентрации копильных компонентов в образцах жидкости при изменении количества сжигаемого топлива в ряду от 1 до 6 кг/ч с шагом 1 кг/ч, что находит свое отражение в изменении цветности образцов [3] (рис. 6, *а*, *б*, *в*).

В рамках эксперимента по получению копильной жидкости AS для отвода тепла от аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль" осуществлялась также циркуляция в системе охлаждения ХН с температурой минус  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . В этом случае, как и в предыдущих сериях экспериментов, площадь охлаждающей поверхности варьировалась в ряду от  $0,67$  до  $1,32 \text{ м}^2$  с шагом  $0,67 \text{ м}^2$ . Количество сжигаемого топлива варьировалось также в ряду от 1 до 6 кг/ч с шагом 1 кг/ч. Цветность характерных образцов копильной жидкости, полученной в данных условиях, иллюстрируется рис. 7.

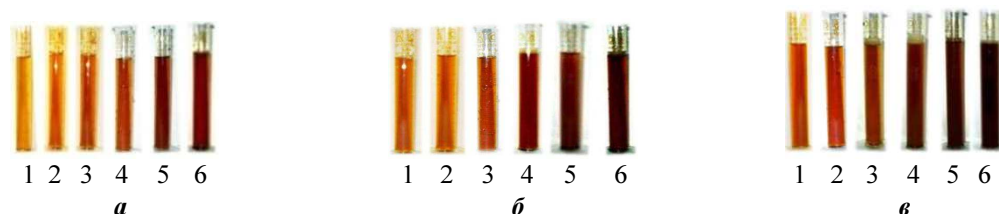


Рис. 7. Внешний вид образцов копильной жидкости AS:  
*а* – площадь ТОП  $0,67 \text{ м}^2$ ; *б* – площадь ТОП  $1,34 \text{ м}^2$ ; *в* – площадь ТОП  $2,00 \text{ м}^2$   
Fig. 7. Appearance of samples of AS liquid smoke:  
*а* – the HTS area –  $0.67 \text{ м}^2$ ; *б* – the HTS area –  $1.34 \text{ м}^2$ ; *с* – the HTS area –  $2.00 \text{ м}^2$

Во всех случаях наблюдается устойчивая тенденция к повышению насыщенности цвета характерных образцов экспериментальной копильной жидкости, а также концентрации копильных веществ при увеличении



количества отводимого тепла. Этому способствует изменение площади теплообменной поверхности в ряду от 0,67 до 2,00 м<sup>2</sup> с шагом 0,67 м<sup>2</sup> и варьирование температуры ХН, циркулирующего в контуре охлаждения экспериментальной установки, от плюс 4 до минус 26 °С с шагом 7,5 °С. Увеличение площади теплообменной поверхности в указанных пределах способствует более полному улавливанию частиц аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый водный аэрозоль".

Отвод тепла от аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый аэрозоль" способствует эффективному улавливанию частиц аэрозоля с абсорбированными на их поверхности копильными компонентами и капель, образующихся при пересыщении паров продуктов пиролиза древесного сырья, тем более, чем ниже температура циркулирующего в системе ХН.

При отсутствии отвода тепла процесс каплеобразования прекращается уже при количестве сжигаемого топлива, превышающем 3 кг/ч [3]. Это связано с тем, что, вследствие повышенной температуры аэродисперсной системы в абсорбере, ее недостаточной относительной влажности, малой объемной доли водного аэрозоля в системе, без применения дополнительного охлаждения, стимулирующего процесс каплеобразования, частицы изучаемой аэродисперсной системы не успевают сконденсироваться и частью испаряются, а частью уносятся с газами, отводимыми из установки через систему вытяжки.

По итогам предварительных расчетов, с учетом конструктивных особенностей применяемого абсорбера, было принято решение не расширять ряд теплообменных площадей в большую сторону и в дальнейших исследованиях зафиксировать площадь охлаждающей поверхности на уровне 2,00 м<sup>2</sup>.

На основании приведенных экспериментальных данных был также сделан вывод о целесообразности применения в дальнейших исследованиях ХН с температурой минус 26 °С. При понижении температуры ХН, циркулирующего в системе охлаждения установки, процесс каплеобразования начинается при меньшем влагосодержании аэродисперсной системы в камере смешения, что доказывает эффективность снижения температуры ХН [8]. В этом случае доля частиц изучаемой аэродисперсной системы "дымовые газы и акустически генерируемый водный аэрозоль", которая неэффективно уносится газами, отводимыми из установки через систему вытяжки, минимизируется, что позволяет увеличить производительность установки.

В результате обработки данных было получено следующее уравнение регрессии для процесса абсорбции при получении копильной жидкости AS:

$$Y = 0,0553 + 0,0177 \cdot X_1 - 0,0005 \cdot X_2 - 0,0002 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (5)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии проводилась при помощи критерия Фишера с использованием программы научных и инженерных расчетов DatafitVer.8.2. Численные значения коэффициентов регрессии были проверены на значимость путем сравнения вычисленных и табличных значений *t*-критерия Стьюдента с учетом принятого уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . За исключением коэффициентов перед квадратичными членами, коэффициенты регрессии были признаны значимыми. Вычисленное значение критерия Фишера  $F = 103,9$ ; коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,956$ . Сравнение вычисленного значения критерия Фишера с табличным значением позволяет сделать вывод об адекватности модели и статистической значимости регрессионного уравнения. Поверхность отклика факторного пространства представлена на рис. 8.

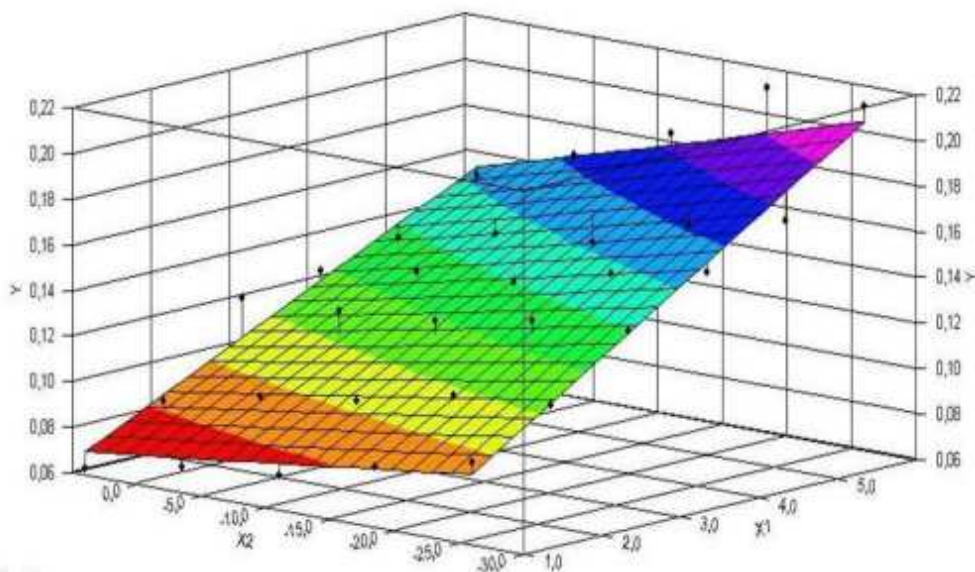


Рис. 8. Поверхность отклика факторного пространства  
Fig. 8. The surface of response factor space

### Заключение

Опытным путем определены близкие к оптимальным параметры для процесса абсорбции при получении копильной жидкости AS: температура хладоносителя, циркулирующего в системе охлаждения, °С, от минус 11 до минус 26, количество сжигаемого топлива, кг/ч, от 3 до 5.

Установлено, что отвод тепла от аэродисперсной системы при протекании процесса абсорбции копильных компонентов дымовой среды мелкодисперсным акустически генерируемым водным аэрозолем способствует интенсификации коагуляционных и абсорбционных процессов, выявлено, что в изучаемом диапазоне температур хладоносителя наиболее эффективен температурный уровень минус 26 °С.

По результатам экспериментальных работ была модернизирована опытно-промышленная установка для получения копильного препарата "Сквама–2", разработанная и изготовленная на кафедре технологий пищевых производств Мурманского государственного технического университета [9]. В процессе модернизации осуществлен монтаж охлаждающего блока, а также блока озвучивания аэродисперсной системы, образующейся в абсорбере за счет смешения дымового и аэрозольного потоков. Опираясь на результаты экспериментальных исследований процессов абсорбции и коагуляции, протекающих в указанной аэродисперсной системе, результаты математического моделирования данных процессов, были определены рациональные параметры технологического процесса получения копильной жидкости AS. Установлены рациональные значения следующих технологических параметров: количество сжигаемого топлива от 3 до 5 кг/ч, температура хладоносителя, циркулирующего по контуру охлаждения, минус 26 °С, уровень звукового давления ультразвуковых колебаний – от 140 до 155 дБ, производительность генератора аэрозоля – от 2 125 до 2 550 г/ч. Ориентировочные значения расхода сырья, материалов и электроэнергии на 1 дм<sup>3</sup> копильной жидкости AS: древесное сырье – от 0,7 до 1,5 кг; вода – от 4,0 до 4,8 дм<sup>3</sup>; электроэнергия – от 2,8 до 4,4 кВт·ч.

На основании проведенных исследований разработан проект "Технологической инструкции по изготовлению копильной жидкости на основе дымовой среды ИК-дымогенератора и акустически генерируемого аэрозоля" и проект технических условий "Копильная жидкость AntonioSilver". Для производственной апробации результатов исследований в учебно-экспериментальном цехе МГТУ произведен выпуск партии солено-сушеной продукции снеки морские "Моремикс+" с применением в качестве ароматизатора копильной жидкости AS, проект ТУ и ТИ на снеки морские "Моремикс+".

### Библиографический список

1. Устройство получения копильной жидкости : пат. 101617 Рос. Федерация / Иваней А. А., Никонова А. С., Голубева О. А. № 2010135229/13 ; заявл. 23.08.10 ; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.
2. Устройство для получения копильного препарата с использованием ультразвука : пат. 142505 Рос. Федерация / Иваней А. А., Никонова А. С. № 2013151555/13 ; заявл. 19.11.13 ; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18.
3. Никонова А. С. Исследование способа получения копильной жидкости на основе акустически генерируемого аэрозоля // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 2. С. 90–97.
4. Устройство для получения копильного дыма с использованием энергии ИК-излучения : пат. 2280367 Рос. Федерация / Ершов А. М., Шокина Ю. В., Обухов А. Ю. № 2004118474/13 ; заявл. 18.06.04 ; опубл. 27.07.06, Бюл. № 13.
5. Ким И. Н. Эколого-технологические аспекты копчения пищевых изделий : монография. Владивосток : Дальневосточ. техн. рыбохоз. ин-т, 2004. 203 с.
6. Курко В. И. Химия копчения. М. : Пищевая пром-сть, 1969. 343 с.
7. Мезенова О. Я. Обоснование принципов технологии рыбных продуктов при использованных дифференцированных жидких копильных сред : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Калининград, 2000. 48 с.
8. Иваней А. А., Никонова А. С. Исследование процесса коагуляции при получении копильной жидкости "AntonioSilver" // Международный науч.-исследов. журнал. 2015. № 9 (40). Ч. 2. С. 28–31.
9. Способ получения копильного препарата и устройство для его осуществления : пат. 2172106 Рос. Федерация / Ершов А. М., Гроховский В. А., Дубровин С. Ю., Беспалова В. В. ; заявл. 18.06.2004 ; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21.

### References

1. Ustroystvo polucheniya koptilnoy zhidkosti [Apparatus for producing liquid smoke] : pat. 101617 Ros. Federatsiya / Ivaney A. A., Nikonova A. S., Golubeva O. A. N 2010135229/13 ; zayavl. 23.08.10 ; opubl. 27.01.11, Byul. N 3.
2. Ustroystvo dlya polucheniya koptilnogo preparata s ispolzovaniem ultrazvuka [Apparatus for producing smoking preparation using ultrasound] : pat. 142505 Ros. Federatsiya / Ivaney A. A., Nikonova A. S. N 2013151555/13 ; zayavl. 19.11.13 ; opubl. 27.06.14, Byul. N 18.
3. Nikonova A. S. Issledovanie sposoba polucheniya koptilnoy zhidkosti na osnove akusticheskoi generiruемого aerolya [Investigation of process for producing liquid smoke based on acoustically generated aerosol] // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Ser. Protssesy i apparaty pischevykh proizvodstv. 2015. N 2. P. 90–97.

4. Ustroystvo dlya polucheniya koptilnogo dyma s ispolzovaniem energii IK-izlucheniya [Apparatus for producing smoke using IR radiation energy] : pat. 2280367 Ros. Federatsiya / Ershov A. M., Shokina Yu. V., Obuhov A. Yu. N 2004118474/13 ; zayavl. 18.06.04 ; opubl. 27.07.06, Byul. N 13.

5. Kim I. N. Ekologo-tehnologicheskie aspekty kopcheniya pischevyyh izdeliy [Ecological and technological aspects of smoked food products] : monografiya. Vladivostok : Dalnevostoch. tehn. rybohoz. in-t, 2004. 203 p.

6. Kurko V. I. Himiya kopcheniya [Chemistry of smoking]. M. : Pischevaya prom-st, 1969. 343 p.

7. Mezenova O. Ya. Obosnovanie printsipov tehnologii rybnyh produktov pri ispolzovannykh differentsirovannykh zhidkih koptilnykh sred [Rationale for the principles of fishery products with the technologies used differentiated liquid smoking media] : avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. Kaliningrad, 2000. 48 p.

8. Ivaney A. A., Nikonova A. S. Issledovanie protsessa koagulyatsii pri poluchenii koptilnoy zhidkosti "AntonioSilver" [Study of the coagulation process in preparation of the liquid smoke "Antonio Silver"] // Mezhdunarodnyy nauch.-issledov. zhurnal. 2015. N 9 (40). Ch. 2. P. 28–31.

9. Sposob polucheniya koptilnogo preparata i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya [Process for preparing the smoking product and device for its realization] : pat. 2172106 Ros. Federatsiya / Ershov A. M., Grohovskiy V. A., Dubrovin S. Yu., Bepalova V. V. ; zayavl. 18.06.2004 ; opubl. 27.07.2006, Byul. N 21.

#### Сведения об авторах

**Похольченко Вячеслав Александрович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра технологического и холодильного оборудования, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой; e-mail: PokholchenkoVA@mstu.edu.ru

**Pokhol'chenko V. A.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Technological and Refrigerating Equipment, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of Department; e-mail: PokholchenkoVA@mstu.edu.ru

**Иваней Александр Антонович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра технологического и холодильного оборудования, канд. техн. наук, доцент; e-mail: AL00212@yandex.ru

**Ivaney A. A.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Technological and Refrigerating Equipment, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: AL00212@yandex.ru

**Никонова Антонина Сергеевна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра технологического и холодильного оборудования, канд. техн. наук, ст. преподаватель; e-mail: nikonova5422@yandex.ru

**Nikonova A. S.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Technological and Refrigerating Equipment, Cand. of Tech. Sci., Chief Lecture; e-mail: nikonova5422@yandex.ru

**Кайченев Александр Вячеславович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010; Мурманский государственный технический университет, Морской институт, кафедра автоматизации и вычислительной техники, канд. техн. наук, доцент; e-mail: kc\_05@mail.ru

**Kaychenov A. V.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Marine Institute, Department of Automation and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, e-mail: ican2005@yandex.ru



V. A. Pokhol'chenko, A. A. Ivaney, A. S. Nikonova, A. V. Kaychenov

### **Improving the system of absorption unit refrigeration**

The problems of improving the absorption stove cooling system for high quality liquid smoke producing have been discussed in the paper. There is absorption stove construction presented which includes absorber, heat exchanger, low-temperature chamber, ultrasound radiator, and water spray generator. The data on the color depending of the experimental liquid smoke on main factors influencing the process – the coolant temperature and amount of fuel burned – have been presented. The specific surface of the fuel mass fraction of water in the fuel has been determined according to standard procedures. Transparency, color and intensity of staining smoke fluid have been determined organoleptically. The liquid smoke according to the requirements of the current normative documents on safety performance indicators has been tested by standard methods: determination of benzo(a)pyrene, phenol compounds and heavy metals. The equation for estimation the complex quality criterion of experimental liquid smoke on the basis of its chemical composition has been presented. The main factors influencing the complex quality criteria of experimental liquid smoke have been given there. They include the sound pressure level, amount of wood raw material required for pyrolysis, heat exchanging surface, refrigerant temperature, and ultrasound water spray generator efficiency. After processing the experimental data the regression equation of producing liquid smoke by absorption has been received. With the help of the mathematical modeling for absorption process of smoke components by fine-dispersed spray the rational parameters of liquid smoke processing have been founded. The project of technological instructions for the liquid smoke production by using the wood smoke and acoustically generated aerosol has been designed. The project of technical requirement "Liquid smoke Antonio Silver" has been designed as well; it has been tested at producing the commercial batch of dried hydrobionts (snakes).

**Key words:** cooling system, absorption stove, liquid smoke, ultrasound, water spray, heat exchanger.